

Apport de la télédétection spatiale à la gestion intégrée du lagon de Saint-Gilles / La Saline

à l'île de La Réunion

Un exemple d'application : cartographie et suivi des zones susceptibles à l'érosion des sols, entre 1995 et 2002, par intégration de données Spot

Valérie Soti

Directeur du projet : Agnès Bégué (CIRAD, Laboratoire AMIS-Geotrop, Montpellier)
Tuteur SILAT : François Colin (ENSAM, Montpellier)
Rapporteurs : Emmanuelle Vaudour (INAPG, Paris-Grignon)
Edouard Beauvillain (ENSG, Marne-La-Vallée)

Novembre 2003



Lettre de mission

Commanditaire et responsable de stage :

Agnès Bégué, Laboratoire Geotrop 1, CIRAD-AMIS

Maison de la Télédétection, 500 rue Jean-François Breton, 34093 Montpellier cedex 5

Tel 33- (0)4 67 54 87 54 ; Fax 33- (0)4 67 54 87 00. E-mail agnes.begue@cirad.fr

Tuteur :

François Colin, UMR LISAH

Agro.M; Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

2, place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex 1

Tél. : 04 99 61 22 51 - Fax : 04 67 63 26 14. E mail francois.colin@ensam.inra.fr

Rapporteurs :

Edouard Beauvillain, Responsable de la cellule pédagogique et de recherche en télédétection

E.N.S.G, Ecole Nationale des Sciences Géographiques

6-8, avenue Blaise-Pascal, Cité Descartes, Champs- sur-Marne, 77455 Marne la Vallée cedex 2

Tél. : 01 64 15 31 94 - Fax : 01 64 15 31 07. E mail Beauvillain@ensg.ign.fr

Emmanuelle Vaudour

UER Dynamiques des Milieux et Organisations Spatiales (DMOS), **I.N.A-PG - Grignon**

Institut National Agronomique Paris-Grignon - Centre de Grignon, BP1 78850 Grignon

Tél. : 01 30 81 52 75 - Fax : 01 30 81 52 70. E Mail emmanuelle.vaudour@grignon.inra.fr

Mastérien :

Valérie Soti, Mastère SILAT (Système d'Information Localisée pour l'Aménagement des Territoires)

Maison de la télédétection, 500 rue Jean-François Breton, 34093 Montpellier cedex 5

Tel 33- (0)4 67 54 87 45 ; Fax 33- (0)4 67 54 87 00. E mail soti@teledetection.fr

Projet

Apport de la télédétection spatiale à la gestion intégrée du lagon de Saint-Gilles / La Saline à l'île de La Réunion.

Cette étude s'insère dans le cadre du projet AGIL (Aide à la Gestion Intégrée des Littoraux), réunissant un consortium multidisciplinaire au sein duquel le CIRAD-AMIS apporte ses compétences en matière de télédétection appliquée à la gestion des ressources agricoles et naturelles. L'objectif au travers de ce stage est la mise en relation des modes d'occupation du sol avec la qualité des eaux du récif corallien de Saint-Gilles / La Saline à l'île de La Réunion. La finalité étant d'apporter et de développer des produits cartographiques opérationnels intégrant des données spatiales.

Le projet consiste :

1. Synthétiser les facteurs naturels et anthropiques pouvant influencer directement ou indirectement sur l'écosystème corallien
2. Etat de l'art et synthèse des données existantes sur le lagon
3. Etablir une méthodologie de classification simple et reproductible de l'occupation du sol
4. Mise en relation des données occupation du sol avec des indicateurs sur la qualité des eaux du lagon
5. Evaluer des seuils d'occupation du sol mettant en péril le lagon

Résumé

Cette étude réalisée à l'île de La Réunion, s'inscrit dans le cadre du projet AGIL (Aide à la Gestion Intégrée des Littoraux) qui propose une approche innovante de la gestion côtière par l'utilisation des technologies spatiales d'observation de la Terre.

C'est sur la thématique de l'occupation du sol que nous avons illustré l'apport des images satellite SPOT à 20 m de résolution spatiale. A partir d'une étude de cas réalisée sur le bassin versant de Saint-Gilles / La Saline bordé d'une barrière récifale, nous avons cherché à montrer cet apport au travers de la question de l'érosion identifiée comme un facteur important de dégradation de l'écosystème lagunaire.

Nous avons ainsi développé une méthode simple et reproductible de classification des types d'occupation du sol par l'utilisation d'un système expert géographique testée sur deux années (1995 et 2002). Par intégration de ces données dans un Système d'Information Géographique (SIG) combinées à d'autres sources d'information, nous avons ensuite réalisé des cartes de vulnérabilité des sols à l'érosion selon une approche multicritère et qualitative. Ce travail a ainsi permis d'identifier l'évolution des zones à fort potentiel d'érosion et de présenter un exemple de support d'aide à la décision.

Mots clefs : Gestion côtière, Occupation du sol, Images satellites, SPOT, Erosion, Ecosystème lagunaire, Classification, SIG, aide à la décision.

Abstract :

This study of the Réunion island within the framework of the AGIL Project (*Aide à la Gestion Intégrée des Littoraux* – Seashore Integrated Management), offers a new seashore management approach using remote sensing technology.

We present an example of land use and land cover classification using the SPOT satellite images with 20 m ground resolution. From a case study carried out on the “*Saint-Gilles / La saline*” watershed side plated with a barrier reef, we demonstrated the potential contribution of SPOT imagery processing through a study of the watershed erosion identified as a significant degradation factor of the lagoonal ecosystem.

We have developed a simple and reliable method of land cover use classification using a geographic expert system at two dates (1995, 2002), integrated the data in a GIS combined with other information and data. We have then produced a map of the zones with erosion hazard using a qualitative multicriteria approach. This study allowed us to identify areas of potential erosion threats and to provide an example of decision management support.

Key words: Seashore integrated management, Land use, Remote sensing, SPOT, Erosion, Lagoonal ecosystem, Classification, GIS, Decision management support

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier mon maître de stage, Agnès Bégué, pour sa confiance, son accueil et ses précieux conseils.

Je remercie également Aurélie Botta qui m'a été d'une grande aide tout au long de ce travail.

Je remercie mon tuteur François Colin pour ses nombreux conseils et pour son investissement pendant ces six mois.

Par ailleurs, mon stage m'a permis d'aller sur le terrain et je tiens donc à remercier tout particulièrement Michel Slepouka qui m'a accueilli chaleureusement à l'IRD de Saint-Denis de La Réunion, Mamy Rakoto, mais aussi Pascale Metzger pour ses qualités tant humaines que scientifiques. Je remercie également Jean-Marie Lafond de la DIREN, Marc Moulin du BRGM, Jean-Luc Folio et Emilie Barthe de l'OLE, mais également Jean-Lambert Join du laboratoire d'hydrogéologie de la faculté des Sciences de Saint-Denis, Pascale Chabanet et Pascale Cuet du Laboratoire d'Ecologie Marine, mais aussi toutes les autres personnes rencontrées sur place qui ont contribué à ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les partenaires de ce projet avec lesquels j'ai eu à collaborer, Frédéric Huynh, Marc Lointier, Laurent Durieux, Valentine Lebourgeois de l'IRD de la Maison de Télédétection de Montpellier.

Je remercie toutes les personnes du laboratoire Geotrop pour leur soutien et leur bonne humeur et tout particulièrement Eric Bappel et Jean-Claude Lorente pour leurs nombreux conseils techniques.

Enfin, je tiens également à remercier Marc Despinoy, initialement mon maître de stage, qui malgré son départ en Nouvelle Calédonie a su trouver du temps pour me conseiller et pour suivre mon travail.

LETTRE DE MISSION	2
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES TABLEAUX	6
LISTES DES ANNEXES.....	6
SIGLES ET ABBREVIATIONS :.....	7
INTRODUCTION.....	8
• LE PROJET AGIL	8
• DEFINITION DE LA MISSION	8
• DEROULEMENT DE LA MISSION ET EVOLUTION DES OBJECTIFS	8
• PROBLEMATIQUE GENERALE	9
1. PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE ET ANALYSE DE L’EXISTANT	10
1.1 CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES DU LAGON	10
1.1.1 <i>Caractéristiques environnementales</i>	10
1.1.2 <i>Facteurs de dégradation du lagon</i>	11
1.1.3 <i>Approche systémique</i>	14
1.2 INVENTAIRE ET ANALYSE DES DONNEES COLLECTEES.....	14
1.2.1 <i>Les données</i>	14
1.2.2 <i>Les limites</i>	16
2. CARTOGRAPHIE DES ZONES SUSCEPTIBLES A L’EROSION	16
2.1 OBJECTIFS, OUTILS ET METHODE.....	16
2.1.1 <i>Les objectifs</i>	16
2.1.2 <i>Données et méthode</i>	17
2.1.3 <i>Les paramètres intervenants dans les phénomènes d’érosion hydrique</i>	17
2.2 PREPARATION DES DONNEES.....	18
2.2.1 <i>Elaboration des cartes dérivées du MNT pour la délimitation de la zone d’étude</i>	18
2.2.2 <i>Pré-traitements des images satellitales</i>	19
2.3 LES TRAITEMENTS.....	19
2.3.1 <i>Classification de l’occupation du sol</i>	19
2.3.2 <i>Création des cartes de susceptibilité des sols à l’érosion</i>	22
3. RESULTATS	25
4. DISCUSSION DES RESULTATS	29
5. PERSPECTIVES	30
BIBLIOGRAPHIE.....	31
ANNEXES :	33

Liste des figures

Figure 1 : Eléments de terminologie récifale (Montaggioni, 1978)	11
Figure 2 : Organigramme éco-socio-systémique bassin versant / platier récifal	13
Figure 3: Arbre de décision réalisé sous « Imagine expert classifieur » d'Erda Imagine	21
Figure 4 : Carte des sols selon leur vulnérabilité à l'érosion.....	23
Figure 5 : Carte des pentes selon leur vulnérabilité à l'érosion.....	23
Figure 6: Arbre décisionnel ayant servi à la réalisation des cartes de susceptibilité des sols à l'érosion	25
Figure 7 : Carte de l'occupation du sol le 06/07/1995.....	26
Figure 8 : Carte de l'occupation du sol le 06/07/2002.....	26
Figure 9 : Carte de vulnérabilité des sols en 1995	28
Figure 10 : Carte de vulnérabilité des sols en 2002	28

Liste des tableaux

Tableau 1 : Inventaire des stations d'analyse des eaux de surface sur Saint-Gilles / La Saline (OLE) .	14
Tableau 2 : Inventaire des stations d'analyse des eaux souterraines sur Saint-Gilles / La Saline (OLE)	15
Tableau 3 : Inventaires des données pluviométriques sur Saint-Gilles / La saline (CIRAD-CA).....	15
Tableau 4 : Caractéristiques des images satellitaires traitées	17
Tableau 5 : Hiérarchisation des classes géologiques selon leur érodibilité.....	22
Tableau 6 : Hiérarchisation des pentes selon leur sensibilité à l'érosion.....	24
Tableau 7 : Regroupement des types d'occupation du sol en fonction du taux de recouvrement végétal.....	24
Tableau 8 : Occupation du sol (ha et %) sur le bassin versant de Saint Gilles la Saline en 1995 et 2002 calculée à partir des classifications réalisées.	27

Listes des annexes

Annexe 1: Localisation géographique de l'île de La Réunion.....	34
Annexe 2 : Localisation géographique de la zone d'étude	34
Annexe 3 : Inventaire des images satellitaires initialement proposé par le CNES	35
Annexe 4 : Matrice de confusion de la classification non-supervisée du 06/07/95.....	38
Annexe 5 : Matrice de confusion de la classification non-supervisée du 06/07/95 améliorée par le système expert	39
Annexe 6 : Matrice de confusion de la classification non-supervisée du 06/07/02.....	40
Annexe 7 : Matrice de confusion de la classification non-supervisée du 06/07/02 améliorée par le système expert	41

Sigles et abréviations

AGIL : Aide à la Gestion Intégrée des Littoraux

AMIS : Améliorations Méthodologiques pour l'Innovation Scientifique

CIRAD : Centre de Coopération en Recherche Agronomique pour le Développement

COI : Commission de l'Océan Indien

DAF : Direction de l'Agriculture et de la forêt

DIREN : Direction Régionale de l'Environnement

ECOMAR : Laboratoire d'Ecologie Marine de l'université de la Réunion

IFRECOR : Initiative Française pour les Récifs Coralliens

IGN : Institut Géographique National

IRD : Institut de Recherche pour le développement

MTD : Maison de la Télédétection

ORE : Observatoire Réunionnais de l'eau

OLE : Office Local de l'Eau

SIG : Système d'information Géographique

Introduction

• Le projet AGIL

Les zones côtières constituent des espaces complexes de part leur situation géographique où interagissent des processus géophysiques à la fois d'origine marine et terrestre. Ils sont aussi les espaces les plus habités par l'homme. Ils constituent ainsi des lieux où les enjeux socio-économiques et écologiques sont forts, générant des conflits entre les partisans du développement économique et ceux de la préservation du milieu naturel. Cette prise de conscience des conflits d'usage a montré la nécessité d'une gestion intégrée des espaces géographiques pour les collectivités territoriales.

C'est dans ce contexte de demande nationale et internationale croissante que le programme AGIL, (Aide à la Gestion Intégrée des Littoraux) financé par le Réseau Terre & Espace, a été mis en place. Ce projet – composé d'un consortium multidisciplinaire regroupant l'IRD, BRL ingénierie, le CNES, l'IFREMER, le BRGM, SCOT et le CIRAD – veut au travers des *technologies spatiales* d'observation de la Terre apporter de nouveaux outils et méthodes nécessaires à la gestion des zones côtières. Trois sites pilotes d'étude ont été retenus pour répondre à cette problématique : le Pertuis charentais, le Golfe du Lion et l'île de La Réunion.

La contribution du CIRAD au sein de ce projet concerne essentiellement le site de La Réunion et plus spécifiquement, le bassin versant de Saint-Gilles / La Saline qui coïncide avec le plus vaste ensemble récifal de l'île. Au travers de ce projet, la tâche du CIRAD se place sur deux plans : la définition d'indicateurs spatiaux utiles aux études d'impacts sur le lagon, la réalisation d'un ou plusieurs produits commercialisables à partir de données spatiales pouvant s'intégrer dans le cadre d'un projet de gestion intégrée du littoral.

• Définition de la mission

L'engagement initial du CIRAD-AMIS se situe sur l'apport des images satellites pour l'étude des activités humaines et de leurs impacts sur la qualité des eaux de l'ensemble récifale de Saint-Gilles / La Saline. Voici les différentes tâches qui ont été alors définies :

- 1.Synthétiser les facteurs naturels et anthropiques pouvant influencer directement ou indirectement l'écosystème corallien
- 2.Réaliser un état de l'art et une synthèse des données existantes permettant de mesurer de l'état de santé du « lagon » (mission sur le terrain)
- 3.Etablir une méthodologie de classification simple et reproductible de l'occupation du sol
- 4.Mettre en relation des données « occupation du sol » sur une période de 15 ans avec des indicateurs sur la qualité des eaux du lagon
- 5.Evaluer des seuils d'occupation du sol mettant en péril le lagon

• Déroulement de la mission et évolution des objectifs

1.Préparation de la mission de terrain du 1^{er} juin au 07 juillet 2003 :

- Recherche bibliographique sur l'écosystème des récifs coralliens
- Recherche sur les indicateurs
- Inventaire des études effectuées sur la zone
- Inventaire des données existantes et à collecter
- Prise de rendez-vous avec les organismes et les personnes travaillant sur les récifs coralliens
- Traitement préliminaire des images satellites et sélection des sites à visiter prioritairement.

2.Mission à l'île de La Réunion, du 8 juillet au 8 août 2003 :

- Rencontre avec les organismes détenant des données ou travaillant sur le lagon
- Rencontre avec les partenaires AGIL
- Collecte d'informations sur l'occupation du sol à l'aide du GPS et de photographies numériques

3. Du 9 août au 3 novembre 2003 :

- Bilan de la mission et réorientation des travaux : parmi les objectifs terrain fixés, notre principale difficulté a été la collecte de données concernant l'écosystème corallien. Nous avons été confrontés à trois types de problèmes qui ne nous ont pas permis de remplir cette tâche :

- a) L'absence d'un certain nombre de personnes qui avaient pourtant répondu aux courriers (mission en période de vacances)
- b) Une collaboration difficile voire impossible avec certains organismes
- c) L'insuffisance des données collectées

Nous avons donc dû redéfinir notre méthode de travail pour répondre à la problématique posée. La mise en relation des données « occupation du sol » avec les indicateurs du lagon a été suspendue. Nous avons donc concentré notre étude sur la partie continentale en nous interrogeant sur les facteurs de dégradation du récif corallien. Parmi ces facteurs, nous avons choisi de traiter le problème de l'érosion hydrique que nous allons appréhender par l'analyse spatiale et par l'intégration de données satellitaires SPOT.

- Définition de la méthodologie
- Traitement des images satellites et intégration des données dans un SIG
- Restitution des travaux

• Problématique générale

Les études inventoriées sur les zones récifales de l'île de La Réunion ont été menées dans la majorité des cas par des instituts de recherche spécialisés (Laboratoire d'Ecologie Marine), par des associations (Le Parc Marin) ou par des organismes publics mandatés pour la protection environnementale (La DIREN). Elles permettent d'établir un bilan sur l'état de santé des récifs et d'identifier les principaux facteurs de la dégradation passée et actuelle (ARVAM, 1989). Ces études sont d'une utilité incontestable pour l'observation et l'étude des écosystèmes coralliens, mais elles ont un caractère souvent statique (Etude d'état, rapport) excluant la dimension dynamique des interactions s'exerçant entre le lagon et le bassin versant. Or les signes de dégradation sur l'état de santé du lagon sont pour une grande majorité dus aux pressions anthropiques.

L'érosion des sols (pentes + lixiviation...) que nous allons traiter, est identifiée clairement comme un des facteurs mettant en péril les récifs coralliens. Elle est un phénomène naturel aggravé par les aménagements humains. Elle fait encore l'objet de nombreuses études utilisant des modèles d'érosion qui nécessitent de nombreux paramètres dont la composante « occupation du sol ». Or ce critère connu pour être un facteur déterminant dans les mécanismes d'érosion est souvent sous évalué par manque d'information ou de moyen. Pour l'île de La Réunion, comme pour l'ensemble de la France, l'information « occupation du sol » la plus utilisée est celle de l'IGN (Institut Géographique National) au travers de son produit « BD topo ». Elle est une référence reconnue par sa qualité et son niveau de précision, mais elle présente le défaut d'une actualisation qui n'est pas systématique, offrant ainsi une information souvent périmée. Concernant l'île de La Réunion, la BD Topo @IGN date de 1997 et la couche « occupation du sol » ne sera pas renouvelée. Or, elle est une information en mouvement constant surtout sur la bande littorale ouest qui fort développement économique et urbain. Cette carence ne permet donc pas de répondre avec satisfaction aux problématiques concernant l'interrelation bassin versant / lagon et plus spécifiquement aux impacts des modes d'occupation du sol sur les processus d'érosion.

C'est dans ce contexte que nous avons choisi de montrer l'apport des images satellites comme outil de gestion complémentaire pour l'observation et la gestion du littoral au travers de la question de l'érosion. Le but étant de proposer un support cartographique permettant d'identifier les zones à fort potentiel d'érosion auxquelles nous préconisons une attention toute particulière par des mesures de terrain soignées.

1. Présentation de la zone d'étude et analyse de l'existant

1.1 Caractéristiques environnementales du lagon

1.1.1 Caractéristiques environnementales

- **Situation générale**

La Réunion, île de l'ouest de l'Océan indien (annexe 1), forme avec Maurice et Mayotte l'archipel des Mascareignes. Située à 21° 07' de latitude nord et 55° 32' de longitude Est, elle se caractérise par un climat de type tropical à influence océanique marqué par deux saisons : *l'hiver austral* de mai à octobre qualifié de saison fraîche et sèche qui connaît des températures douces (de 18° à 25° en moyenne) et des pluies peu abondantes; et *l'été austral* de novembre à avril qui est la saison chaude ou "saison des pluies" se caractérisant par des températures en moyenne de 23° à 30°, par une humidité et des précipitations importantes, notamment lors de phénomènes climatiques naturels tels que les cyclones.

Jeune île volcanique, la Réunion est entièrement constituée de coulées basaltiques. Elle s'est édifiée à partir de deux massifs volcaniques distincts : le Piton des neiges détenant le point culminant à 3069 m et actuellement éteint; le Piton de la Fournaise s'élevant à 2631m et encore en activité. La présence de ce relief imposant et accidenté explique la dichotomie climatique et végétale de l'île. On distingue ainsi un côté au vent (cote Est) qui détient des records pluviométriques mondiaux jusqu'à 7m/an et un côté sous le vent (cote Ouest) où l'on enregistre des moyennes annuelles s'échelonnant entre 700 et 525 mm /an, avec parfois des zones géographiques proches du littoral où elles sont quasiment nulles. A cette dissymétrie Est/Ouest s'ajoute une variabilité des températures et des pluies en fonction de l'altitude. Globalement les températures diminuent et les précipitations augmentent avec l'élévation.

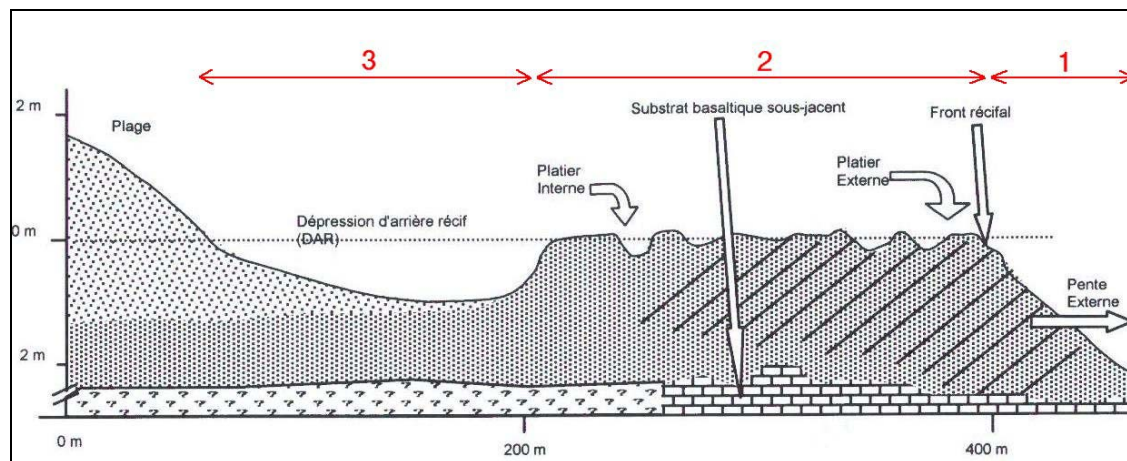
Cette variabilité climatique explique en partie la présence des récifs coralliens sur le littoral ouest et sud de l'île où les conditions géoclimatiques y sont favorables à leur développement. Ils forment une barrière récifale discontinue de 25 km. Leur absence s'explique soit par l'étroitesse du plateau continental sous-marin qui à certains endroits plonge très rapidement à 4000 m de profondeur, soit par la présence de passes naturelles (Cazes et Quod,1999).

- **La zone d'étude : le bassin versant et le récif corallien de Saint-Gilles / La Saline.**

Le bassin versant de Saint-Gilles / La Saline, faisant partie de la commune de Saint-Paul, se caractérise par la présence du complexe récifal le plus important de l'île : 9 km de long sur 450 m dans sa partie la plus large (annexe 2). De type frangeant, il se compose de 4 plate-formes récifales séparées de trois passes qui coïncident aux exutoires de trois importantes ravines (Montaggioni et Faure, 1980) : la ravine de Saint-Gilles à écoulement pérenne, celle de l'Hermitage et de Trois-Bassins à écoulement saisonnier. Depuis le large vers la plage, voici les grands ensembles structuraux (Naim, 1989) qui le caractérise (figure 1) :

1. La pente externe qui constitue la zone de croissance du récif vers le large. Elle est riche en coraux et algues calcaires.
2. Le platier récifal où la diversité en coraux et poissons est très forte. Il se subdivise lui-même en deux parties : le front récifal, proche de la pente externe et sur laquelle se brisent les vagues et une partie interne tournée vers la plage.
3. Vient ensuite la dépression arrière-récifale, (200 à 300 m de large à la Saline) très peu profonde (1m à 1,5m de profondeur). Elle constitue une zone hétérogène, principalement bio-détritique, contenant des colonies coralliennes éparses le plus souvent nécrosées.

Figure 1 : Eléments de terminologie récifale (Montaggioni, 1978)



Cette zone récifale est dépendante de trois bassins versants principaux, celui de Saint-Gilles (10,4 km²), de l'Hermitage (12.1 km²) et de La Saline (4.8 km²) qui depuis une vingtaine d'années connaît une croissance urbaine importante liée en grande partie à l'attraction du site naturel. La zone marécageuse qui caractérisait la bande littorale au début du siècle, a laissé place à la ville et aux activités liées à l'homme. Ces aménagements pas toujours contrôlés, ont profondément transformé le milieu naturel et modifié les équilibres écologiques. La zone récifale se caractérise par un écosystème riche et fragile. C'est parce qu'elle est une zone réceptrice de tout ce qui se passe en amont du bassin versant qu'une attention toute particulière doit être portée sur les activités humaines et les pollutions qui y sont associées.

1.1.2 Facteurs de dégradation du lagon

Le développement d'un récif corallien ne peut se faire que si des conditions écologiques strictes sont respectées. Les coraux bâtisseurs de récifs ou coraux hermatypiques nécessitent des conditions thermiques, de salinité, de limpidité des eaux, d'éclairage et d'oxygénation spécifiques qui les cantonnent aux mers tropicales peu profondes (Naim et Cuét, 1989). Ceci fait d'eux des écosystèmes fragiles et facilement vulnérables à des modifications des conditions du milieu qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique.

- **Les pressions naturelles**

Les cyclones et les dépressions tropicales sont des facteurs importants de dégradation physique des récifs coralliens (IFRECOR). Ils ont à la fois un impact direct de destruction dû à la forte houle qu'ils génèrent et un effet indirect, tout aussi important, en raison des fortes précipitations qui les accompagnent entraînant une forte érosion. On note également, les épisodes d'exondation liés aux grandes marées de vives-eaux (notamment aux équinoxes) qui exposent le récif à l'air libre et au soleil et qui peuvent s'accompagner de blanchissements voir de mortalité importante des parties émergées. Ces événements majeurs mais occasionnels endommagent les récifs, mais présentent le plus souvent un caractère réversible. En effet, la résilience des récifs coralliens à ces pressions naturelles se révèle assez forte comme le témoigne l'exemple du platier récifale de Saint-Leu. Suite au cyclone Firinga de 1989, l'ensemble du récif avait été pratiquement entièrement détruit. En 2003, grâce au potentiel bâtisseur des coraux, il ne présente aucun signe alarmant.

- **Les pressions anthropiques**

A l'île de la Réunion, ce n'est que depuis une vingtaine d'années que les récifs coralliens sont soumis à des pressions d'origine anthropique. En effet, la cote Ouest de l'île est devenue une zone attractive pour l'homme qui y a déployé de nombreuses activités économiques. Sur la commune de Saint-Paul dont font partie Saint-Gilles-les-Bains et La Saline-les-Bains, la population est passée de 71 669 habitants à 87 712 entre 1989 et 1999, soit un accroissement total de 22.5% (TER, 2000). Cette croissance urbaine coïncide avec l'essor des activités liées au tourisme et une intensification des

activités agricoles dans les hauts dont les conséquences sur le milieu naturel sont multiples. Deux types de pressions sont clairement identifiés par les spécialistes :

➤ *Les pressions directes :*

- L'exploitation des ressources halieutiques
- Les activités touristiques : le piétinement et la collecte du corail; le développement des activités nautiques...
- Les aménagements côtiers : l'endiguement des ravines; les constructions en haut des plages ou sur des pentes inadaptées, l'extraction de sable corallien comme matériaux de construction ou encore pour combattre l'acidité des jus de canne.

Ces pressions ont pour conséquences principales l'érosion des plages (Mespoulhé, Troadec, 1994), l'hypersédimentation et la modification de la courantologie.

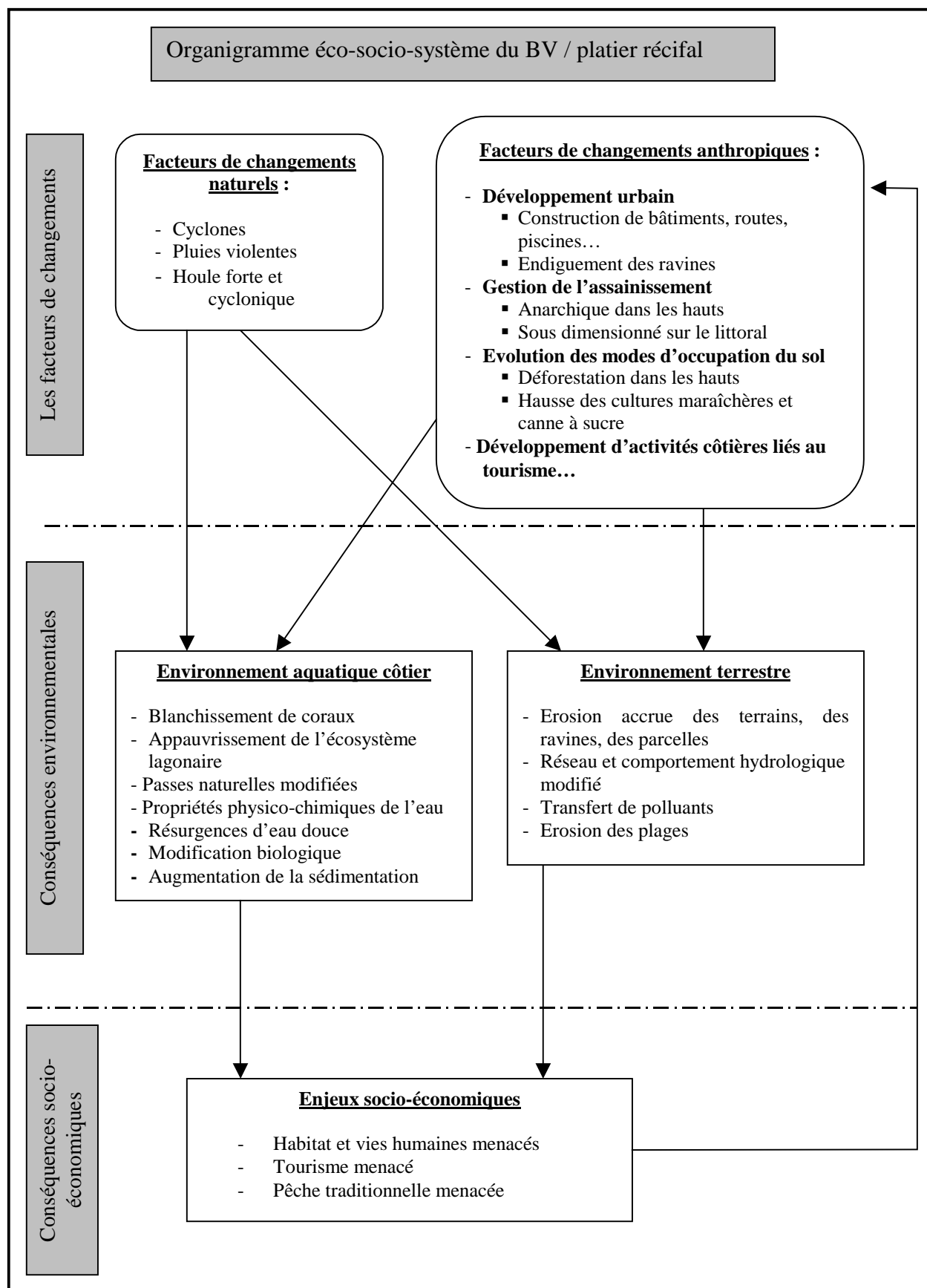
➤ *Les pressions indirectes :*

L'homme de part ses activités est également déclencheur de pressions indirectes qui sont généralement difficiles à mesurer et à localiser. En revanche, l'écosystème corallien, et plus spécifiquement les coraux sont de bons indicateurs de la qualité des eaux du lagon. Depuis une vingtaine d'années, des études ont montré un ralentissement important de la croissance du corail. Deux causes majeures ont été répertoriées : la pollution et la sédimentation terrigène dont les conséquences sont nettement visibles lors des épisodes cycloniques qui s'accompagnent d'un lessivage des sols extrême.

Sur Saint-Gilles / La Saline, la croissance urbaine et le développement des activités économiques ont augmenté les volumes d'eaux pollués se déversant dans le « lagon » (Leynaud and al., 1976). Les eaux usées d'origine domestique, agricole et pluviale n'y sont pas totalement maîtrisées et traitées. La difficulté à raccorder toutes les maisons au réseau d'assainissement collectif est liée à une croissance urbaine d'une grande ampleur que les collectivités locales ont du mal à contenir. Le sous-dimensionnement de la station d'épuration de Saint-Gilles/ La Saline est l'exemple de cette urbanisation non maîtrisée, qui oblige la localité à effectuer des rejets « sauvages » réguliers dans la zone récifale.

L'érosion des bassins versants est le second facteur naturel connu pour responsable de la dégradation de l'écosystème corallien (Saffache, 2002). Phénomène avant tout naturel, l'érosion s'est amplifiée avec les aménagements entrepris par l'homme (Ballet J.L. & al., 1988) : déforestation, défrichement du couvert végétal, construction d'infrastructures urbaines sur des pentes inadaptées... Cette préoccupation est d'autant plus importante lorsque l'on sait que l'île de La Réunion détient les records mondiaux d'érosion naturelle, environ 3000 tonnes/km²/an (Charte de l'environnement). Les études réalisées sur le complexe de Saint-Gilles / La Saline montrent déjà des signes de dégradation importants. On évalue à environ 50 % de platiers récifaux réunionnais perturbés, dont 28% sont fortement dégradés (Naim, 1997). Cette situation est d'autant plus alarmante au regard de la croissance urbaine qui caractérise le bassin versant qui ne présente aucun signe de ralentissement. A cela, s'ajoute l'intensification et la diversification des activités agricoles dans les « Hauts », notamment suite au basculement des eaux terminé en 1999. Cette intensification a d'abord touché la culture de canne à sucre, qui a bénéficié de nouvelles surfaces irriguées appelées « Antennes ». Elles occupaient en 2000, 1400 ha sur 3867 ha de la SAU totale (Recensement, 2000). D'autres « Antennes » ont été prévues, mais leur création est momentanément suspendue en raison de problèmes d'ouvrage concernant la deuxième arrivée d'eau en provenance du cirque de Maffate. Actuellement, tout laisse présager que cette emprise de l'homme sur le milieu va continuer, d'où la nécessité de maîtriser les rejets et les activités humaines si l'on veut préserver l'écosystème corallien de Saint-Gilles / La Saline.

Figure 2 : Organigramme éco-socio-systémique bassin versant / platier récifal



1.1.3 Approche systémique

Cette étude s'inscrit selon la démarche GIZC (Gestion Intégrée des Zones Côtières) adoptée par AGIL. Elle préconise une gestion du territoire respectant un équilibre entre la protection de la nature et le développement des activités humaines. Pour cela une approche systémique est nécessaire prenant en compte la dynamique Bassin versant / Lagon. Elle passe par une phase d'identification des composantes entrant en jeu par rapport à la problématique posée, et l'analyse des interactions qui s'effectuent entre-elles.

C'est la démarche que nous avons suivie pour notre étude sur Saint-Gilles / La Saline et que nous avons résumée sous forme d'organigramme (figure 2). Ce support nous a, entre-autre, permis de voir à quel niveau les données issues des images satellitales SPOT pouvaient s'avérer utiles, notamment en terme de suivi et contrôle de la vulnérabilité des sols à l'érosion. C'est sur le plan de l'occupation du sol, que l'apport de l'imagerie satellitale s'est imposé. En effet, l'occupation du sol est connue comme un facteur déterminant sur les processus d'érosion. Les images satellites permettant assez aisément d'identifier cette composante, nous avons donc choisi de travailler sur l'impact des changements d'occupation du sol sur la vulnérabilité des sols à l'érosion par analyse diachronique.

1.2 Inventaire et analyse des données collectées

1.2.1 Les données

- **Les données concernant l'écosystème corallien**

Deux familles de données sont généralement utilisées pour l'évaluation de l'état de santé du lagon : la qualité générale des eaux (paramètres physico-chimiques, polluant...) et le comptage le long d'une radiale des espèces végétales et animales, avec la prise en compte d'espèces spécifiques indicatrices d'un milieu perturbé ou non.

A l'île de la Réunion, les données sont récentes. Ce n'est que depuis 1997 qu'un programme de suivi régulier a vu le jour, dans le cadre de programmes régionaux de la Commission de l'Océan Indien (COI) incluant cinq états insulaires (Comores, Madagascar, Maurice, Réunion et Seychelles). A la Réunion, l'action « suivi récif » a débuté par la création d'un Groupe de Travail Récif (GTR), qui s'est progressivement structuré, à partir de 1998, autour des différents acteurs locaux (DIREN, Collectivités, Association Parc Marin, Université, ARVAM).

- Analyse chimique des eaux de surface.

C'est auprès de l'OLE (Office Local l'Eau) de Saint-Denis que nous avons pu avoir accès à une série de données sur les composantes chimiques de l'eau : température, conductivité, nitrate, nitrite, ammonium, phosphate... Depuis 1997, les mesures sont régulières et les stations de plus en plus nombreuses.

Tableau 1: Inventaire des stations d'analyse des eaux de surface sur Saint-Gilles / La Saline (OLE)

Nom de station	Périodicité	Source
Ravines Saint-Gilles (aval prise du verrou)	Mai, Juin, Oct., Nov, 1996	OLE
Bassin Malheur	De 1998 à 2001 (Deux fois par an)	OLE
Ravines Saint-Gilles (verrou)	De 1997 à 2002 (Deux fois par an)	OLE
RN1	De 1998 à 2002 (Deux fois par an)	OLE
Hermitage	De 2002 à 2002 (Deux fois par an)	OLE

Il existe également des mesures de salinité et de sels nutritifs qui ont été réalisées par le laboratoire d'ECologie MARine (ECOMAR) à partir de 1991. Mais les mesures n'ont pas toujours été réalisées aux même endroits, ni avec la même fréquence d'échantillonnage.

- Analyse chimique des eaux souterraines

Les données concernant l'analyse chimique des eaux souterraines sont également réalisées par l'OLE, mais cette « nouvelle » donnée est une acquisition récente et ne permet encore son analyse.

Tableau 2: Inventaire des stations d'analyse des eaux souterraines sur Saint-Gilles / La Saline (OLE)

Nom de station	Périodicité	Source
Bassin Malheur	De 2001 à 2002	OLE
Hermitage F1	2001	OLE
Forage Saline	2001	OLE
Hermitage S6	De 2001 à 2002	OLE

- Structure des communautés benthiques

La majorité des données ont été collectée par le laboratoire ECOMAR (Chabanet P. et Naim O.). De nature ponctuelle, les prélèvements n'ont pas été effectués systématiquement aux mêmes endroits, ce qui rend leur exploitation difficile notamment dans le cadre d'étude diachronique. Néanmoins, il existe des mesures sur le phénomène de blanchissement des coraux. Elles ont débuté fin mars 1998, dans le cadre du programme régional de la Commission de l'Océan Indien (PRE/COI) et sont actualisées tous les 3 à 4 ans, par le Parc Marin.

- **Les données issues des images satellitales**

En tant que projet RTE, le CNES-QTIS a mis à la disposition du projet une série d'images satellitales sur l'île de La Réunion, que l'on peut consulter sur le site http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion/web/frameset/f_serveur.html. Cette base de données satellitales est composée d'images SPOT 1 à 4 (soit environ deux images par an) à 20 m de résolution spatiale, certaines en mode panchromatique, d'autres en mode multispectral (XS). Initialement prévue à partir de 1986, seules les images à partir de 1989 sont actuellement disponibles sur le site. Nous disposons également d'images SPOT 5, programmées jusqu'en mai 2004, qui ont une résolution spatiale de 10 m, en XS. Certaines d'entre-elles ont été rééchantillonnées à 2 m 50.

- **Les autres données**

- Données climatologiques

Tableau 3 : Inventaires des données pluviométriques sur Saint-Gilles / La saline (CIRAD-CA)

Types de donnée	Stations	Périodicité	Source
Pluies quotidiennes	L'Hermitage	Du 5 mai 2002 au 14 juillet 2003	CIRAD
ETP	L'Hermitage	Du 5 mai 2002 au 14 juillet 2003	CIRAD
Pluies horaires	L'Hermitage	Du 4 mai 2002 au 8 juillet 2003	CIRAD
Pluies quotidiennes	La Saline	Du 1 janvier 1989 au 8 juillet 2003	CIRAD
Pluies horaires	La Saline	Du 16 mars 2000 au 16 juillet 2003	CIRAD

Ces données sont encore insuffisantes pour des études hydrologiques (bilan hydrique, études des eaux de ruissellements) ou de transfert de polluant, nécessitant des stations en amont et en aval de chaque micro-bassin et bassin hydrologique. D'autres données climatologiques sont disponibles auprès de Météo France que nous n'avons pas exploitées faute de temps.

- Ortho-photo, IGN 1987 (échelle : 1/30 000)
- BdD TOPO@IGN, 1987
- Parcellaire cannier de la DAF réactualisé en 2002 et 2003
- MNT au pas de 25m (IGN, 1997)
- Carte morpho-pédologique au 1/10 000 (Raunet, 1989)

1.2.2 Les limites

L'inventaire et la collecte des données ont permis de soulever un certain nombre de problèmes d'ordre méthodologique et thématique lié à la complexité même qu'induit l'approche écosystémique de la gestion intégrée environnementale.

Aussi chercher à réaliser des interrelations entre des données d'origines variées et voir leur évolution dans le temps, n'est pas toujours une tâche évidente. En effet, ces difficultés sont essentiellement liées à la diversité de la nature des données (description de surface, concentration en polluant, pluviométrie...), à la variabilité spatiale (mesures ponctuelles ou zonales), et enfin à la variabilité temporelle des données elles-mêmes et des processus physico-chimiques qui les caractérisent.

Dans le cadre de cette étude, la raison principale qui nous a contraints à réorienter notre problématique est cette variabilité temporelle et spatiale des données. Initialement, il était prévu d'essayer d'établir une relation entre les modes d'occupation des sols et la qualité des eaux du récif corallien de Saint-Gilles / La Saline entre 1986 et 2002. Certes nous disposons d'un jeu de données spatiales intéressant, mais nous n'avons pas de données environnementales correspondantes. La seconde difficulté relevait également du choix du temps d'observation pertinent pour étudier une évolution. Prenons l'exemple du blanchissement des coraux, des statistiques existent, mais elles ne sont régulières que depuis 1997. En les observant de plus près, nous nous sommes rendus compte, que six années d'observation n'étaient pas suffisantes pour en dégager une tendance claire, et ne permettaient donc pas d'émettre d'hypothèses sur leur origine. Face à ce constat, nous avons recentré notre étude sur les facteurs et les processus physico-chimiques d'origines anthropiques responsables de la dégradation du récif. Nous avons choisi de travailler sur le problème de l'érosion des sols et de leur évolution par l'utilisation de la télédétection spatiale et des SIG. Les résultats seront traduits au travers de cartes de vulnérabilité des sols à l'érosion.

2. Cartographie des zones susceptibles à l'érosion

2.1 Objectifs, outils et méthode

2.1.1 Les objectifs

L'hypersédimentation de matériel terrigène résultant des phénomènes d'érosion sur les bassins versants et véhiculé par les eaux pluviales dans les zones récifales constitue l'une des nuisances actuelles les plus importantes sur le lagon (Wickel, 2000). A La Réunion, ces processus érosifs sont connus comme étant naturellement importants (BRGM, 1994). Ces phénomènes d'érosion, en majeure partie d'origine géologique, sont difficiles à maîtriser et s'accroissent avec les aménagements réalisés par l'homme. Malgré leurs impacts écologique et économique, ces apports terrigènes ne sont pas précisément quantifiés car coûteux en temps et en argent. Certes, des modèles d'érosion ont été mis en place, mais ils n'ont pas bénéficié de validation de terrain. En observant de plus près ces modèles, nous nous sommes aperçus que le paramètre « occupation du sol » était bien souvent sous-estimé ou dépassé, alors qu'il est connu comme étant un des facteurs déterminants dans les processus d'érosion.

C'est sur ce plan, qu'il nous est apparu intéressant de montrer un des apports de la télédétection. En effet, elle permet assez aisément d'identifier les différents modes d'occupation du sol et du fait de sa possible répétitivité, permet une mise à jour régulière des données. Afin de montrer l'influence du type d'occupation du sol sur les processus d'érosion, nous avons choisi de réaliser deux cartes de vulnérabilité des sols à l'érosion, l'une en 1995, l'autre en 2002. L'objectif étant d'offrir un document cartographique permettant d'identifier des zones à risques et de suivre leur évolution. Il pourra ainsi servir de support de décision afin de déterminer des sites d'études prioritaires.

2.1.2 Données et méthode

- **Les données**

- *Le choix des images satellitaires*

Parmi la banque de données satellitaires Isle-Réunion du CNES, un tri des images a été nécessaire. Nous disposons d'images SPOT 1 à SPOT 5 couvrant la période de 1989 à 2003. Seules, deux images multispectrales ont été retenues. Notre choix a été fondé sur les critères suivant :

- La fréquence de la couverture nuageuse liée aux caractéristiques climatiques de la Réunion. C'est durant les mois de juin à fin septembre, que les images sont les plus exploitables. En effet, ils correspondent à la période hivernale caractérisée par de faibles pluies et donc une faible nébulosité.
- La fréquence des scènes ne couvrant pas toujours entièrement notre zone d'étude (pointe Ouest souvent tronquée).
- L'absence d'image entre octobre 1989 et l'année 1992.
- La fréquence des images en mode panchromatique uniquement.
- Des exigences par rapport à l'approche multi-temporelle qui préconise d'effectuer des traitements d'images à la même saison mais également avec une fréquence respectée (nombre d'années entre deux images).

Nous avons ainsi sélectionné deux images de juillet, d'une part parce qu'il y a peu de nuages et d'autre part, parce que c'est la période durant laquelle la discrimination entre les types d'occupation du sol est la plus aisée. En effet, les sols nus y sont rares, réduisant ainsi les confusions entre la canne coupée (parcelle à paillis) et les sols nus. Voici les images que nous avons retenues :

Tableau 4 : Caractéristiques des images satellitaires traitées

<i>Satellite</i>	<i>Date d'acquisition</i>	<i>Mode spectral</i>	<i>Résolution</i>	<i>Angle d'incidence</i>
SPOT3	06/07/1995	XS (V,R,PIR)	20m	1,5R
SPOT5	06/07/2002	P+XS	10m	25,08R

Elles ont été traitées selon la combinaison des canaux 3,2,1 qui permet de discriminer au mieux la végétation des autres objets.

- *Le MNT de l'IGN au pas de 25 m qui permettra la création de cartes dérivées.*
- *Carte morpho-pédologique sous format numérique au 1/10 000 (Raunet, 1989)*

- **La méthode**

- Inventaire et collecte des données disponibles
- Traitement des images satellites sous Erdas Imagine 8.5
- Constitution de la base de données
- Hiérarchisation des paramètres (arbre décisionnel)
- Cartographie de synthèse sous Arcview 3.2 et Arc Info

2.1.3 Les paramètres intervenants dans les phénomènes d'érosion hydrique

Même si l'eau est définie comme un agent morphogène « moteur » de l'érosion, d'autres facteurs conditionnent également son impact. Ainsi, est appelé facteur d'érosion ce qui facilite ou prédispose la surface du sol à l'action des agents d'érosion (BRGM, 2000). Ces facteurs sont la pluie, le ruissellement, la pente, l'occupation du sol, le sol et le sous-sol. C'est la résultante de leur combinaison qui va limiter ou amplifier l'action de l'agent conditionnant l'érodibilité de cette surface. On entend donc par « érodibilité » la sensibilité du milieu aux agents d'érosion (BRGM, 2000). Parmi les facteurs cités et pour des raisons de non-accessibilité à toutes les données, nous n'avons pris en compte que quelques paramètres intervenant dans les phénomènes érosifs :

- **Les paramètres d'ordre naturel**

- ***La topographie :***

La pente est un élément essentiel de par son action gravitaire. Elle agit sur la vitesse de ruissellement et donc sur l'impact de l'ablation de matériaux détritiques.

- ***Le substratum :***

Le sol est un second paramètre qui participe activement au processus d'érosion en fonction de sa capacité d'infiltration (selon la pierrosité, la perméabilité et la battance) et de l'aptitude des particules à la détachabilité. Dans le cadre de cette étude, par manque de données, seule la nature du sol et sa vulnérabilité à l'érosion sera prise en compte.

- **Un paramètre anthropique**

- ***L'occupation du sol :***

Le type d'occupation du sol est un paramètre important qui selon sa nature favorise ou non les phénomènes d'érosion. L'effet de la couverture végétale va dépendre à la fois du taux de recouvrement du sol, de sa durée dans l'année et des caractéristiques liées aux types de végétaux présents (hauteur, type de racine).

2.2 Préparation des données

2.2.1 *Elaboration des cartes dérivées du MNT pour la délimitation de la zone d'étude*

Le lagon, de part sa position, est un exutoire naturel de tout ce qui se trouve en amont. Nous avons donc fait le choix de délimiter notre zone d'étude en fonction du bassin versant hydrologique dont il dépend. Nous avons délimité ce bassin versant à partir d'un MNT en mode grille « raster » au pas de 25 m. Voici les étapes que nous avons suivies :

- **Elimination des « trous »**

Pour éviter toute incohérence du type rupture d'écoulement, nous avons éliminé tous les puits locaux. Pour cela, nous avons appliqué un algorithme classique dit « bouche trou » qui consiste à relever arbitrairement les altitudes des pixels « puits » de façon à imposer un ruissellement vers les cases voisines. Cette méthode a l'avantage d'être automatique et de générer rapidement un MNT cohérent.

- **Création de grille de direction (DIRFLUX) et d'accumulation des flux (ACCFLUX)**

La seconde étape a été de calculer un plan des directions d'écoulement par maille élémentaire (DIRFLUX ou Codes d'écoulement). Elle consiste à définir la direction de flux à partir du pixel voisin le plus bas. Le fichier DIRFLUX permet de générer un plan des surfaces drainées par accumulation des cases (nommé ACCFLUX) qui consiste à ajouter le poids de chaque pixel qui coule dans le pixel voisin de plus faible altitude.

- **Amélioration du MNT par incrustation du réseau hydrographique**

Le MNT seul est incapable de générer un réseau hydrographique correct. Les perturbations et les erreurs sont d'autant plus grandes que les surfaces du bassin étudié sont faibles et que les altitudes sont proches du niveau de la mer (Charleux et Puech, 2000). Afin d'améliorer la grille d'accumulation de flux et rendre les tracés d'écoulement cohérents par rapport au réseau hydrographique, nous avons opté pour la *technique ingénierie* qui consiste à forcer le passage des eaux par des données extérieures. Pour cela nous avons utilisé le réseau hydrographique en mode vecteur issu de la BD TOPO®IGN que nous avons intégré au MNT en le surcreusant. Ce surcreusement est une opération qui force les écoulements pour les pixels de ce drain et de leur voisinage immédiat. Il permet d'obtenir un MNT optimisé en terme de directions d'écoulement.

- Délimitation du bassin versant

Une fois la carte des surfaces drainées obtenue, nous avons cherché à délimiter le bassin versant hydrologique dont dépend le lagon de Saint-Gilles / La Saline. Pour cela nous avons utilisé la commande « Watershed » sur Arcinfo qui permet de déterminer l'aire contributive en un point quelconque choisi sur le MNT. Son utilisation est simple, il suffit de sélectionner des points exutoires en aval du bassin versant et l'on obtient automatiquement les sous-bassins versant dont dépend chaque point. Après la fusion de chaque unité hydrographique, nous avons obtenu la délimitation du bassin versant final, que nous avons utilisé pour extraire notre zone d'étude des images satellites.

2.2.2 *Pré-traitements des images satellitaires*

Les images ayant été préalablement orthorectifiées, les corrections géométriques n'ont pas été nécessaires. En revanche, d'autres étapes ont été nécessaires pour faciliter le traitement des données :

- Dégradation à 20 m de l'image Spot 5 du 06/07/02

Afin de pouvoir comparer les deux images satellites entre-elles, nous avons dégradé la résolution spatiale de SPOT 5, de 10 m à 20 m afin qu'elles aient la même résolution spatiale.

- Extraction du bassin versant

A partir du fichier obtenu suite à la délimitation du bassin hydrologique de la zone, nous avons utilisé ce dernier pour extraire notre zone d'étude sur chaque image satellite.

- Correction radiométrique et extraction des zones d'ombre

Nous avons procédé à une correction radiométrique relative en corrigeant les effets d'ombre de l'image par intégration des angles d'élévation et d'azimut solaires dans l'algorithme de correction. Ceci a permis de normaliser les valeurs de pixel sur l'ensemble de la scène.

- Extraction des zones urbaines

Les zones urbaines ont été extraites par seuillage géographique puis par seuillage visuel. Elles ont permis d'atténuer les confusions possibles entre les sols nus et les zones bâties.

- Extraction des zones nuageuses

Selon le même principe décrit précédemment, nous avons extrait les nuages et leurs ombres.

2.3 Les traitements

2.3.1 *Classification de l'occupation du sol*

L'objectif tout au long de cette étape a été de développer une méthode de traitement d'image simple et reproductible. La méthode que nous avons suivie est marquée par deux étapes : dans un premier temps nous sommes partis d'une classification semi-dirigée que nous avons dans un second temps améliorée par l'intermédiaire d'un arbre décisionnel que nous avons construit. Afin d'évaluer l'amélioration de la qualité de la classification, nous avons confronté nos résultats à des documents de référence par l'intermédiaire d'une matrice de confusion qui nous a notamment permis de calculer du coefficient Kappa. Cette opération a été réalisée avant et après utilisation de l'arbre décisionnel.

- La classification non-supervisée

Afin de distinguer un maximum d'objets au sol, nous avons choisi dès le départ un grand nombre de classes (40). 9 itérations et une convergence de 0.95 ont été suffisants pour obtenir des résultats satisfaisants. Suivant la typologie de l'occupation du sol établie par la BD TOPO®IGN, nous avons procédé à un regroupement de classes en fonction des signatures spectrales des objets présents au sol et de notre connaissance du terrain. Compte tenu de la faible résolution spectrale (20m) des images satellites, nous avons été contraints d'agréger certaines classes, comme la 'jachère' intégrée à la classe 'Friche' et à ne pas différencier les différents types de parcelles culturales (verger,

maraîchage). Sur le bassin de Saint-Gilles / La Saline, il est vrai que ces cultures occupent une très faible superficie, moins de 2 % de la SAU totale. En revanche, la canne est majoritaire avec 1857 ha (Recensement agricole, 2000). En considérant ces éléments et compte tenu des contraintes techniques, seule la culture de « canne à sucre » a été retenue au sein de notre typologie. Voici les six classes obtenues :

1. Sol nu
2. Prairie et STH
3. Savane
4. Friche
5. Canne à sucre
6. Végétation arborée ('Forêt' dans la classification)

- Validation des classifications (phase1)

Afin de valider la qualité des informations obtenues, nous avons choisi d'évaluer leur qualité avec la matrice de confusion réalisée pour chacune des classifications. Pour se faire, nous avons utilisé la BD TOPO@IGN datant de 1997, comme document de référence pour la classification de juillet 1995 et l'image SPOT 5, à 2 m 50 de résolution spatiale, pour la classification de juillet 2002. Nous avons choisi 150 points de contrôle échantillonnés au hasard pour réaliser cette matrice de confusion. Nous avons également calculé le coefficient Kappa pour compléter nos observations.

- *Classification du 06/07/95*

La matrice de confusion révèle 74 % de pixels bien classés (annexe 2). Les confusions les plus importantes concernent essentiellement :

- 1) La canne à sucre avec seulement 54,72% de points bien classés et un coefficient Kappa de 0,43. Sur l'ensemble des points de contrôle en classe 'canne à sucre', 24% correspondent à de la végétation arborée, et 11% à des sols à couverture herbeuse.
- 2) La savane avec 70,72% de points bien classés et un coefficient Kappa de 0,63 représente la seconde source de confusion conséquente, avec 17% de points de contrôle initialement en classe 'Savane' qui dans la réalité sont des zones de friche et 7,31% de points qui dans la réalité sont des sols.

- *Classification du 06/07/02*

77.33 % des pixels ont été bien classés (annexe 3). Les confusions observées sont similaires aux précédentes :

- 1) Sur l'ensemble des points de contrôle en classe 'canne à sucre', 32% correspondent à de la végétation arborée.
- 2) Sur l'ensemble des points de contrôle en classe 'savane', 32% correspondent à du sol nu sur l'image de référence.
- 3) Sur l'ensemble des points de contrôle en classe 'formation herbeuse', 20% des points sont en réalité de la friche.

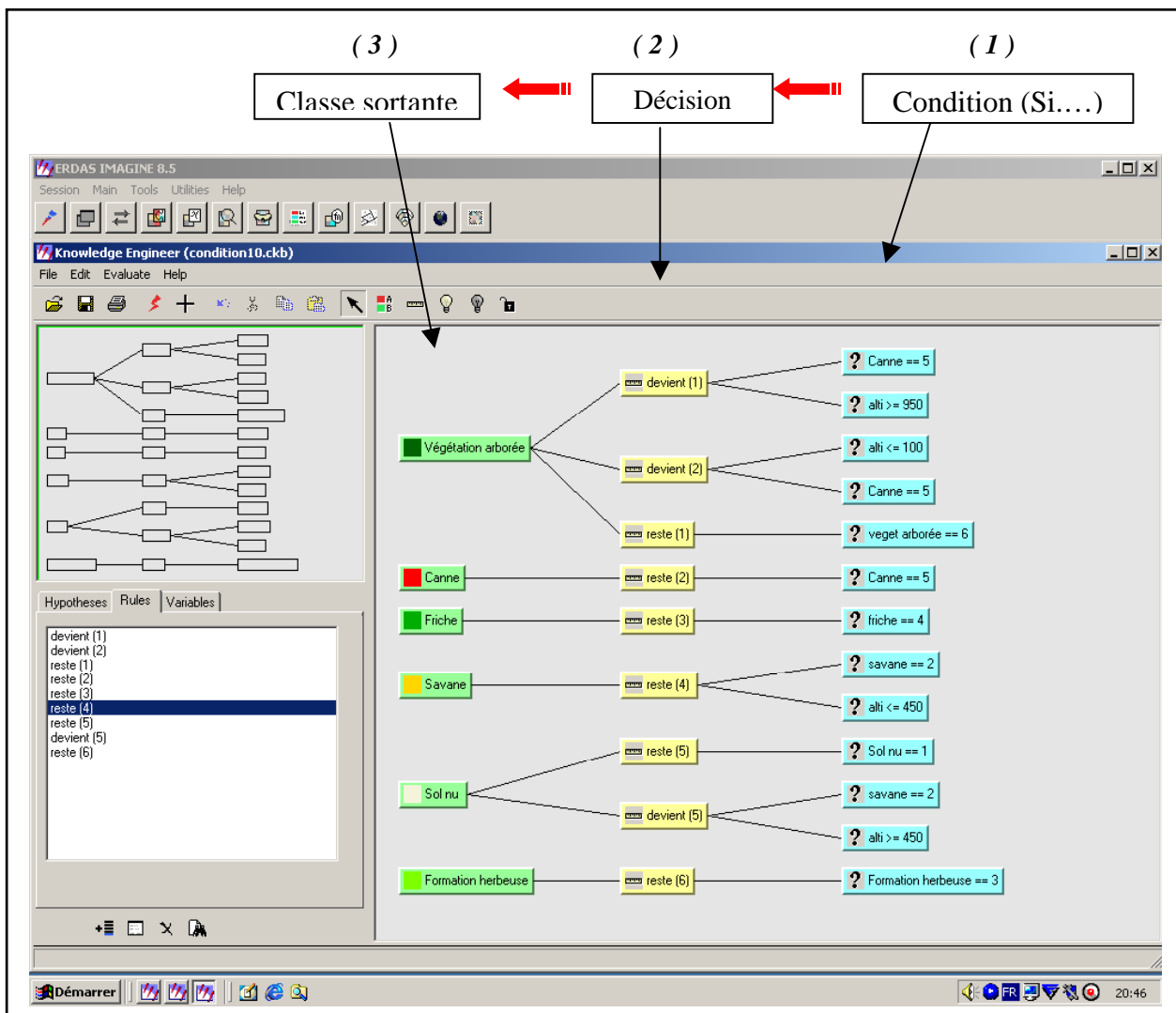
- Amélioration de la classification par le « système expert géographique » d'Erdas Imagine 8.5

Du fait de son relief accidenté, La Réunion présente un étagement de la végétation très contrasté. Ce constat nous a amenés à nous intéresser aux travaux de Michel Raunet sur le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion et notamment à son approche morpho-pédo-paysagère des « unités du milieu » (Raunet, 1999). Son étude lui a permis d'établir une typologie et une répartition spatiale précise de la végétation en fonction de différents critères : le sol, le climat, l'altitude... Nous avons choisi le critère de l'étagement de la végétation pour définir nos règles de décision au sein du système expert géographique « Imagine expert classifier » que le logiciel Erdas Imagine propose. C'est un outil qui s'apparente à un arbre de décision permettant de définir des scénarios indépendants des types de données et se basant sur des règles de classification.

Voici les différentes étapes nécessaires à sa réalisation (figure 3) :

- 1) Déclaration des variables d'entrée. Chacune de nos classes d'occupation du sol a ainsi été définie comme variable.
- 2) Définition des règles de décision, qui vont permettre d'améliorer la classification. Nous avons ainsi défini des conditions strictes d'étagements de la végétation afin de réduire les confusions constatées par la matrice de confusion. Les aires d'extension de la végétation ont été limitées par des seuils d'altitude à partir des références de M. Raunet : 1000 m pour la canne à sucre, 450 m pour la savane, excepté pour les images postérieures au basculement des eaux. D'autres conditions ont été déterminées, mais elles en fonction des connaissances du terrain. Nous savons par exemple que la canne à sucre est absente sur la frange littorale, nous avons donc ajouté cette condition au système.
- 3) Définitions des classes de sortie qui permettent de réaffecter une classe aux pixels 'mal classés'.

Figure 3: Arbre de décision réalisé sous « Imagine expert classifier » d'Erdas Imagine



- Validation des classifications (phase2)

- *Classification du 06/07/95*

On constate une amélioration de la classification, avec un nombre de pixels bien classés qui a augmenté passant de 74 % à 83% et qui s'observe au sein de chaque classe. Ce que confirme le coefficient Kappa passé de 0.46 à 0.78 pour la canne à sucre, de 0.63 à 0.84 pour la savane, et de 0.63 à 0.74 pour les sols nus. Néanmoins, cette amélioration s'est faite au détriment de la classe 'végétation arborée' dont le coefficient est passé de 1 à 0.85, et la classe 'friche' de 0.95 à 0.86.

- *Classification du 06/07/02*

On constate également une nette amélioration de la qualité de la classification, le nombre de pixels bien classés passant de 74 % à 86 %. Les principales classes bénéficiaires sont la canne à sucre dont le nombre de pixels bien classés est passé de 72 % à 90 %, la savane de 64% à 88% et les prairies de 58 à 64 %.

A la lumière de ces résultats, on constate que l'intégration de règles simples de décisions dans le système expert a un double avantage : il est simple d'utilisation et il permet de réduire considérablement les confusions. Dans l'hypothèse où il pourrait s'appliquer à d'autres images à la même période, il permettra également de traiter plusieurs images avec une économie de temps.

2.3.2 *Création des cartes de susceptibilité des sols à l'érosion*

- Hiérarchisation des paramètres

Pour rappel, voici les trois paramètres qui ont été retenus pour la réalisation de la carte de vulnérabilité du sol à l'érosion : la typologie du substratum, la topographie, l'occupation du sol que nous avons déclinée en substratum, déclinité, et capacité de recouvrement. Voici la hiérarchisation que nous avons retenue en fonction de leur contribution au phénomène d'érosion. Elle a été largement inspirée des travaux réalisés par le BRGM de Saint-Denis sur l'étude des aléas d'érosion à l'échelle de l'île :

- *Influence de la nature du sol sur l'érodibilité (figure 4)*

A partir des données morpho-pédologiques au 1/50000 du CIRAD (carte de Raunet, 1991), nous avons déterminé trois niveaux de sensibilité en fonction de la nature du sol :

Tableau 5 : Hiérarchisation des classes géologiques selon leur érodibilité

Regroupement des classes géologiques	
Sols peu érodibles	Sol brun andique Sol brun vertique Coulée (localement vertisol) Vertisol
Sols érodibles	Sol brun andique avec andosol
Sols très érodibles	Alluvions actuelles Alluvions récentes Sable littoral Andosol Andosol vitrique

Figure 4 : Carte des sols selon leur vulnérabilité à l'érosion

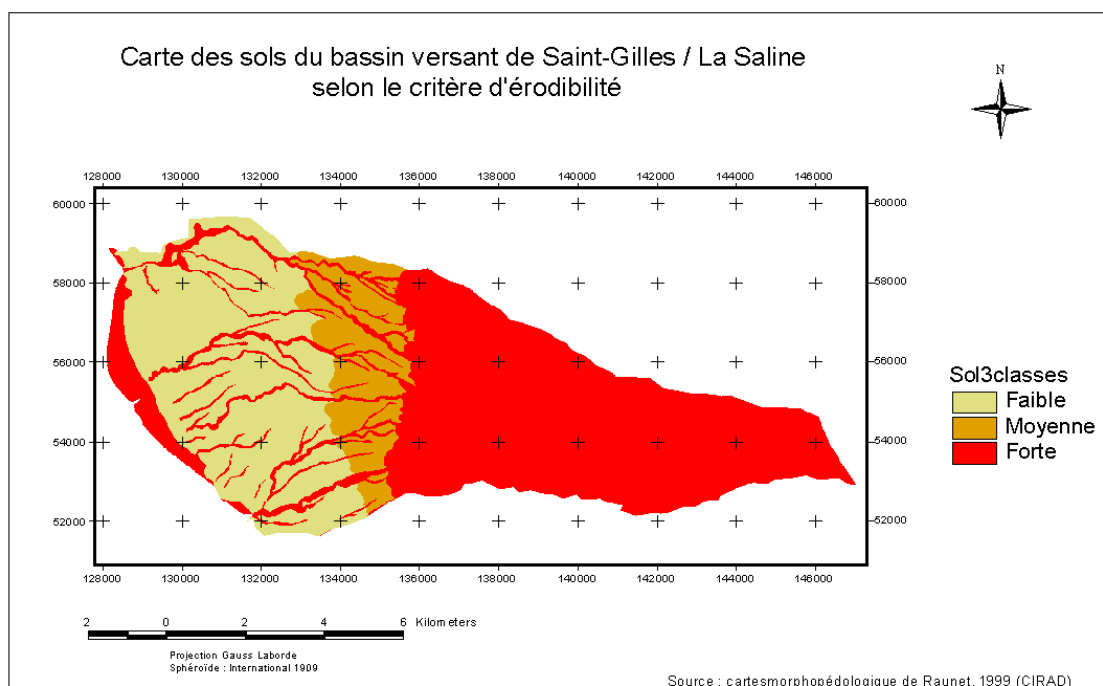
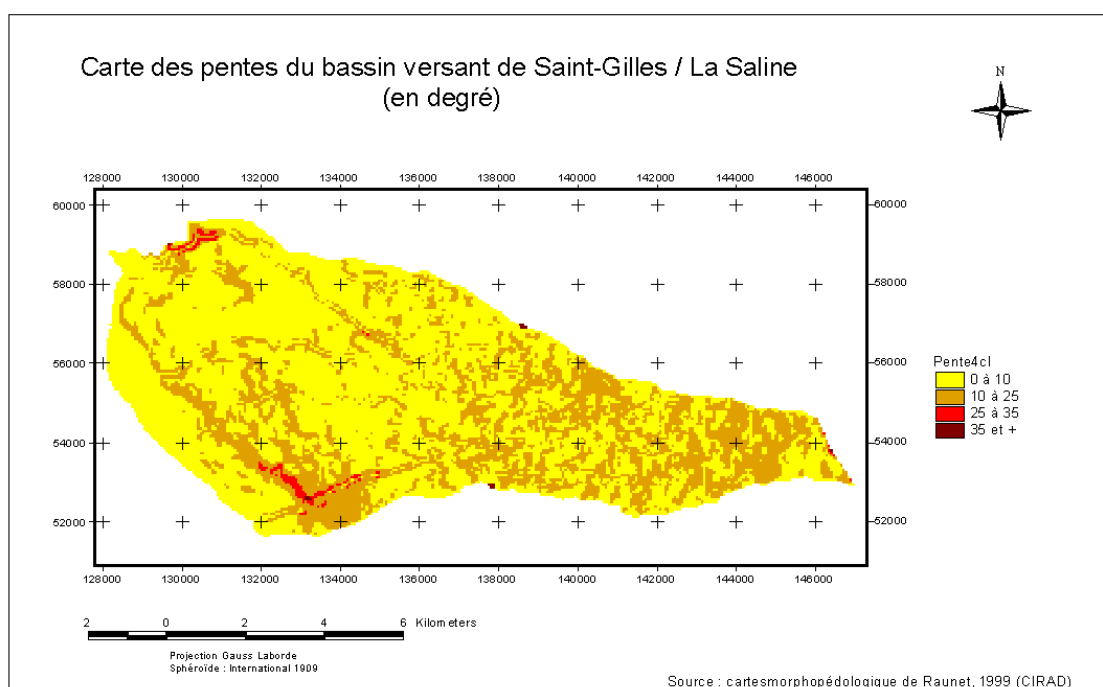


Figure 5 : Carte des pentes selon leur vulnérabilité à l'érosion



➤ *Influence de la pente du sol sur l'érodibilité (figure 5)*

A partir du MNT au pas de 25 m, nous avons réalisé la carte des pentes en degré que nous avons ensuite regroupée en classes de pentes en fonction de leur influence sur les phénomènes érosifs :

Tableau 6 : Hiérarchisation des pentes selon leur sensibilité à l'érosion

Pentes (°)	
Déclivité faible	0 à 10
Déclivité moyenne	10 à 25
Déclivité forte	25 et +

➤ *Influence de l'occupation du sol sur l'érodibilité*

Nous avons déduit de la nature de l'occupation du sol, une capacité protectrice de la couverture végétale au sol. Par exemple, une couverture végétale dense de type « forêt » est connue pour réduire fortement l'érosion par son feuillage. L'abondance des feuilles casse l'énergie cinétique des gouttes de pluies. Les tiges favorisent l'infiltration et les racines maintiennent le sol, en revanche un sol nu ou presque, favorisera les phénomènes d'érosion.

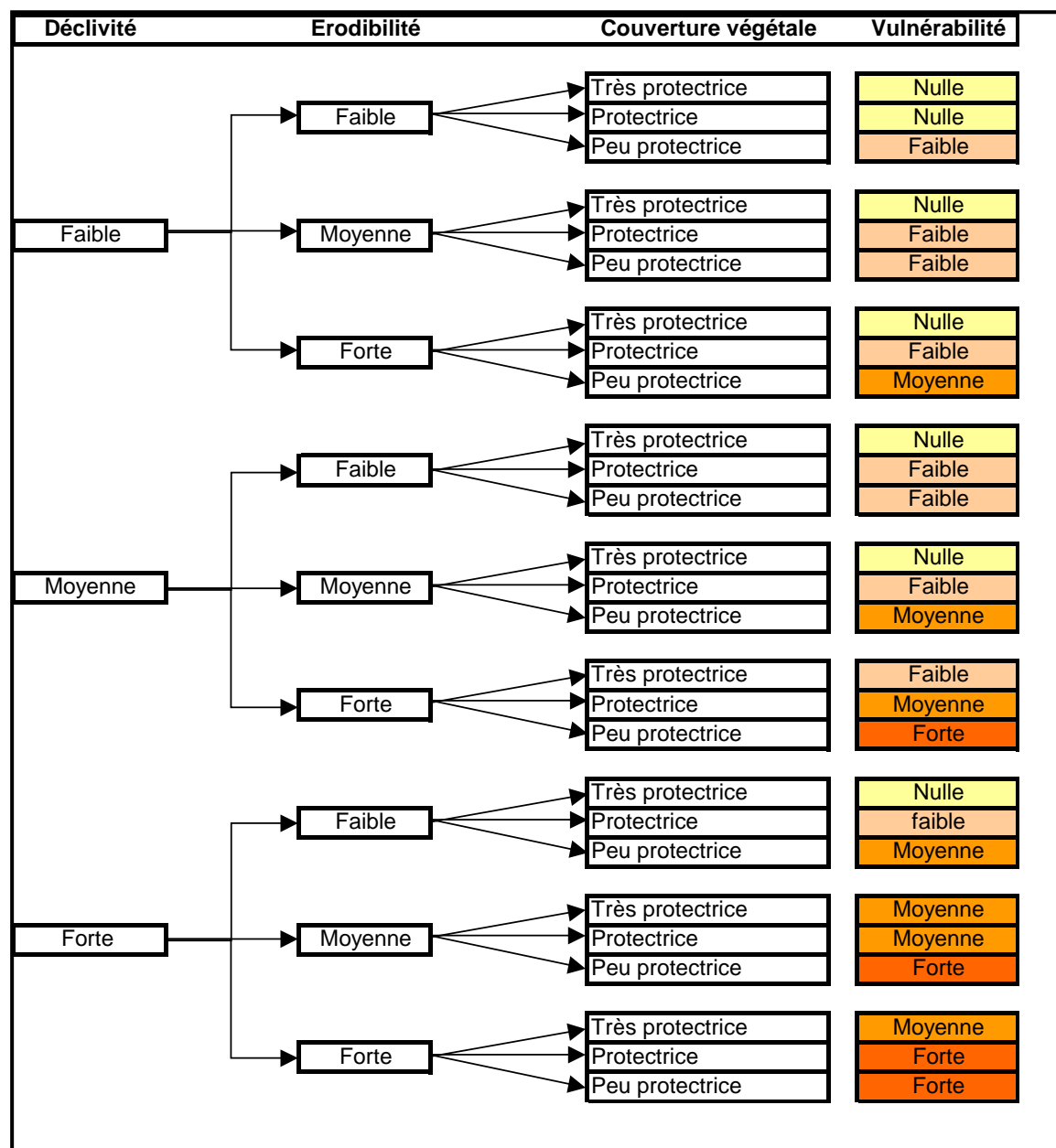
Tableau 7 : Regroupement des types d'occupation du sol en fonction du taux de recouvrement végétal

Occupation du sol reclassée	
Couverture peu protectrice	Sol nu
Couverture protectrice	Savane / Prairie / Friche / Canne
Couverture très protectrice	Végétation arborée

- **Constitution de l'arbre décisionnel (figure 6)**

Il existe deux manières d'aborder l'analyse multicritère : l'approche quantitative et l'approche qualitative. La première suppose que la hiérarchisation des paramètres a été réalisée à partir de mesures de terrain, la seconde en revanche est préconisée lorsque l'on n'en dispose pas suffisamment. C'est la seconde méthode que nous avons adoptée par manque de données qualitatives. La construction de l'arbre de décision et des classes contributives a été volontairement réalisée à partir de considération déductive et logique. Quatre niveaux de susceptibilité du sol à l'érosion ont ainsi été déterminés : nul, faible, moyen et fort.

Figure 6: Arbre décisionnel ayant servi à la réalisation des cartes de susceptibilité des sols à l'érosion



3. Résultats

- Analyse des cartes d'occupation du sol (figures 7 et 8)**

La répartition des types d'occupation du sol en 1995 et en 2002 obtenue à partir des classifications sont résumés dans le tableau 8. Pour les deux années, on observe que les forêts, la zone de savane et les friches occupent les plus grandes superficies. Regroupées, elles représentent plus de 50% de la superficie totale du bassin versant. Viennent ensuite les cultures de canne à sucre avec 13%.

Entre 1995 et 2002, on constate que les zones forestières ont fortement diminué passant de 31,38 à 21,39 % de la superficie totale au dépend des prairies et des STH qui ont vu leur surface triplée, passant de 3,14% à 8,98 %. Elles concernent essentiellement les zones amonts, appelées les « Hauts », de notre site d'étude.

Figure 7 : Carte de l'occupation du sol le 06/07/1995

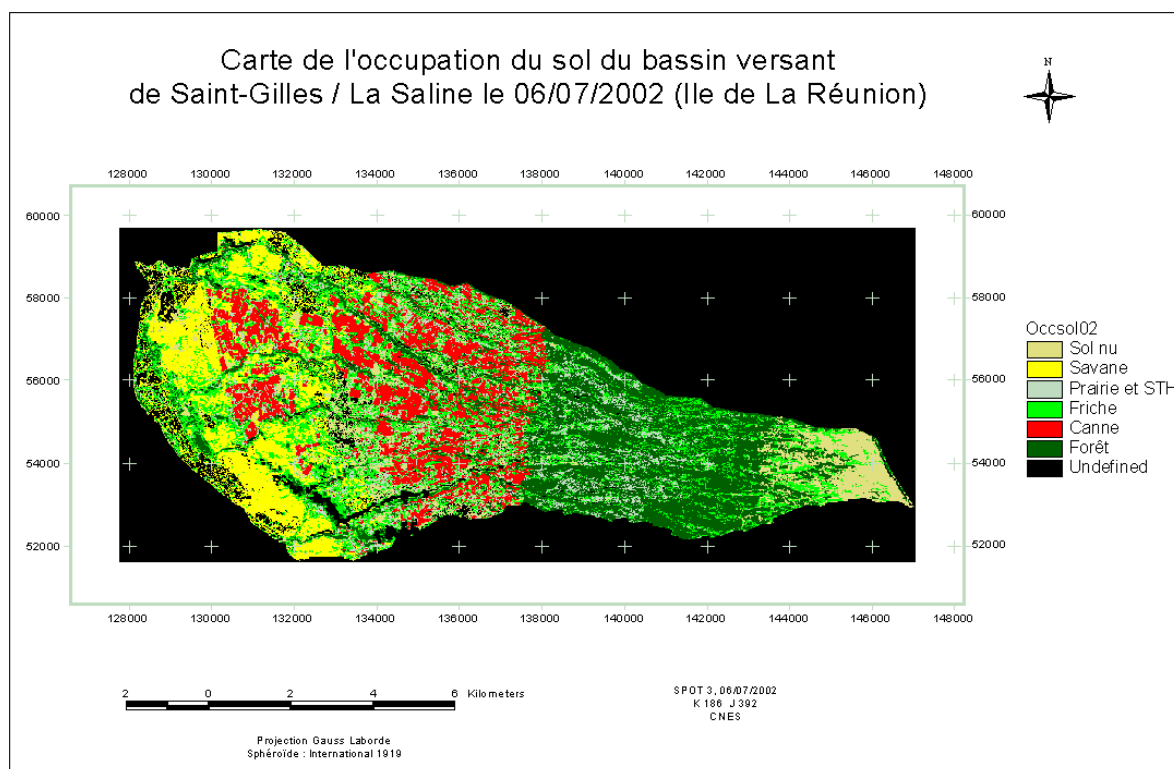
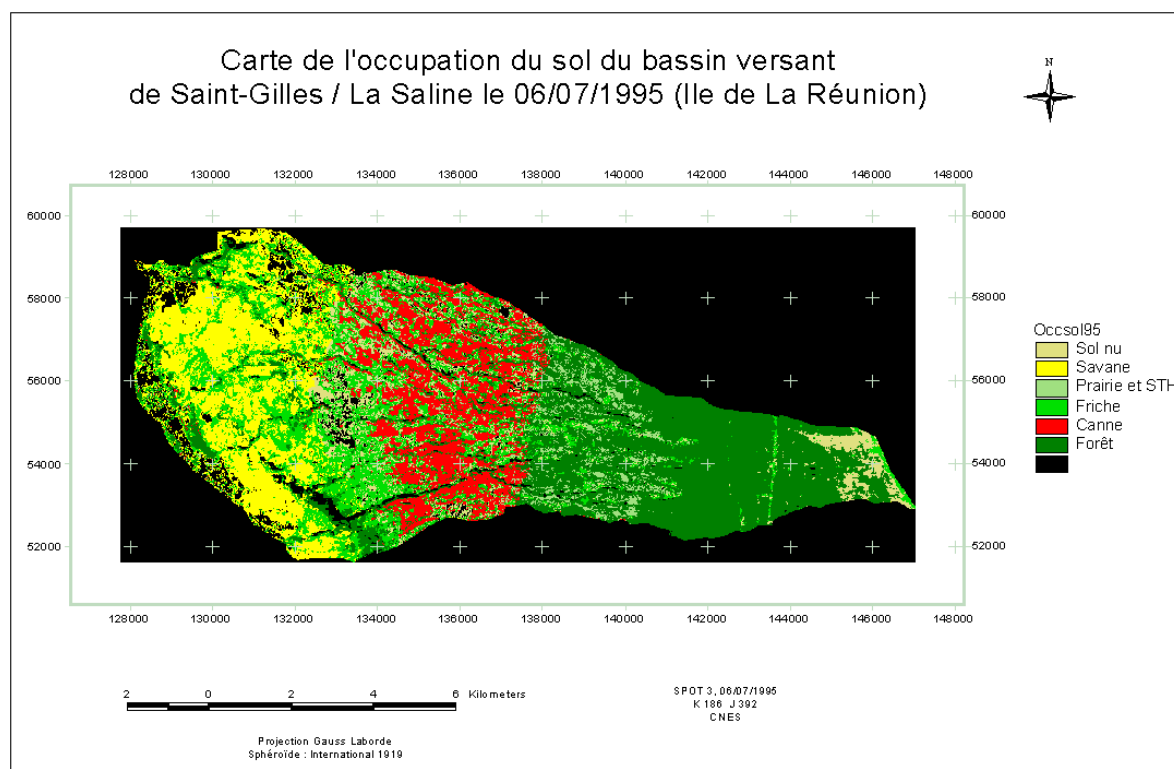


Figure 8 : Carte de l'occupation du sol le 06/07/2002



La zone de savane longeant la bande littorale, a vu également sa superficie diminuée passant de 1492.12 à 1169.88 ha. Cette régression s'explique en partie par la création de l'Antenne 4, suite au basculement des eaux. Paradoxalement, la canne à sucre n'a pas connu d'extension significative, environ 50 ha en plus entre les deux dates.

Afin de valider la confiance de nos observations, nous nous sommes appuyés sur les recensements agricoles de 1989 et de 2000 réalisées par la DAF, malgré le fait qu'ils ne couvrent ni la même période, ni la même zone géographique. En effet, les découpages choisis par la DAF ne coïncide pas exactement au découpage du bassin versant. Nous allons donc présenter des données qui concernent toutes la commune de Saint-Paul dont dépend notre zone d'étude. Ils permettent néanmoins de dresser une tendance que nous allons comparer avec nos résultats issus des images satellites. Dans l'ensemble, à l'échelle de la commune les recensements confortent les tendances observées : baisse des superficies de forêt passant de 207 à 101 ha, hausse des superficies de prairie et de STH passant 350 à 863 ha. Concernant, la canne à sucre, idem, les surfaces ont faiblement augmenté, malgré la création de nouvelles « antennes ». Elle s'explique, en partie, par une diversification des cultures, notamment avec le développement des cultures fruitières, dont les superficies sont passées de 21 à 96 ha entre les deux dates.

Tableau 8 : Occupation du sol (ha et %) sur le bassin versant de Saint Gilles la Saline en 1995 et 2002 calculée à partir des classifications réalisées.

	1995		2002	
	ha	%	ha	%
Sol nu	594,836	7,04	790,88	9,35
Savane	1492,12	17,66	1169,88	13,84
Prairie et STH	265,377	3,14	759,16	8,98
Friche	1751,31	20,73	1808,04	21,39
Canne	1129,8	13,37	1164,92	13,78
Végétation arborée	2651,11	31,38	2124,72	25,14
Zone masquée	563,56	6,67	632,36	7,48
Surface totale	8448,113	100	8449,96	100

Pourquoi les prairies, les cultures fourragères, les parcours et les landes ont connus de telles hausses de superficie ? La télédétection ne permet pas de répondre à cette question. En revanche, les recensements agricoles de 2000 nous permettent d'émettre au moins une hypothèse, celle de la relation entre l'intensification de la filière bovine et l'augmentation des surfaces toujours en herbe. En effet, entre 1989 et 2000, le nombre de têtes de bétail a presque doublé passant de 1389 à 2433.

- **Analyse des cartes de vulnérabilité des sols à l'érosion**

Les cartes de synthèse de 1995 et 2002 (figures 9 et 10) montrent un zonage marqué en fonction de l'altitude. C'est en amont du bassin versant, au delà de 450 m d'altitude que se situent les zones les plus vulnérables à l'érosion. D'aval en amont, quatre zones ensembles se distinguent :

- *La zone littorale de vulnérabilité nulle à faible*, en dessous de 450m d'altitude, peu sensible à l'érosion du fait des faibles pentes, de la présence de sols imperméables (vertisol), et enfin parce qu'elle constitue un secteur bien drainé (zone urbaine et parcelles cultivées avec drainage).
- *La zone de faible à moyenne vulnérabilité*, entre 450 m à 950 m, qui correspond à l'aire de la culture. On constate que cette vulnérabilité augmente à la limite de l'aire l'extension de la canne à sucre, située à 950 m d'altitude. Elle est une zone de transition, marquant le passage vers des sols (andosols) et des pentes favorables au processus d'érosion.

Figure 9 : Carte de vulnérabilité des sols en 1995

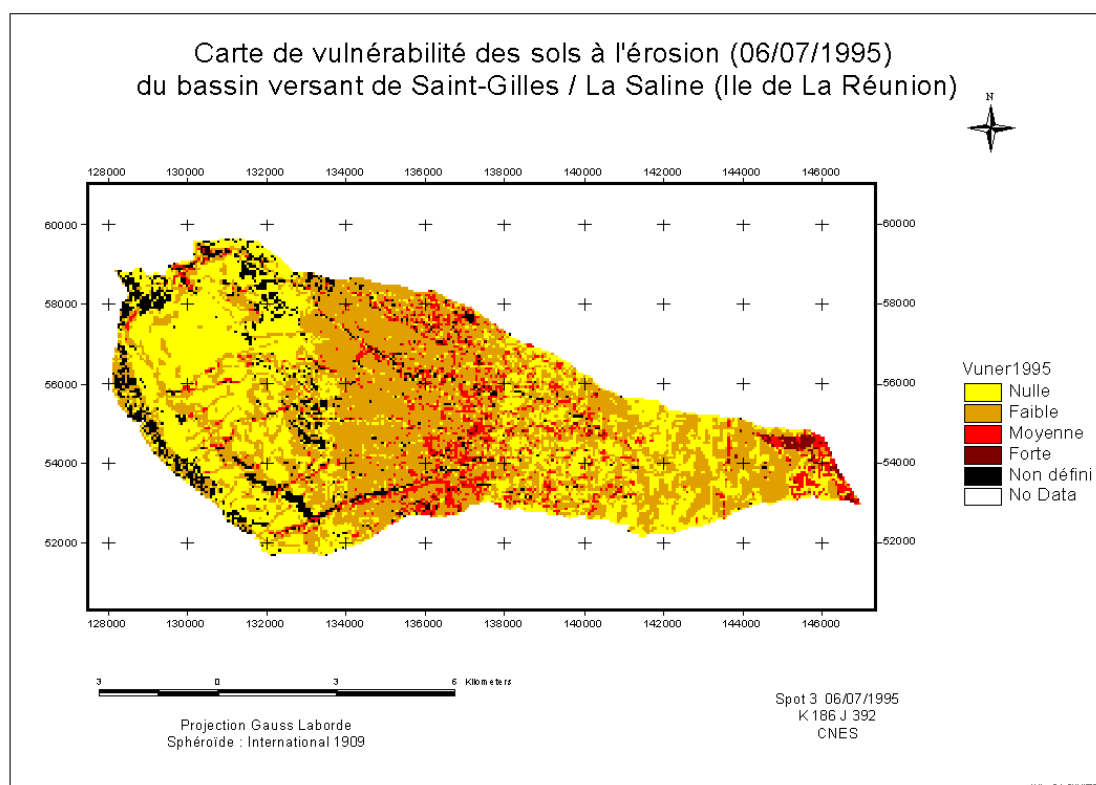
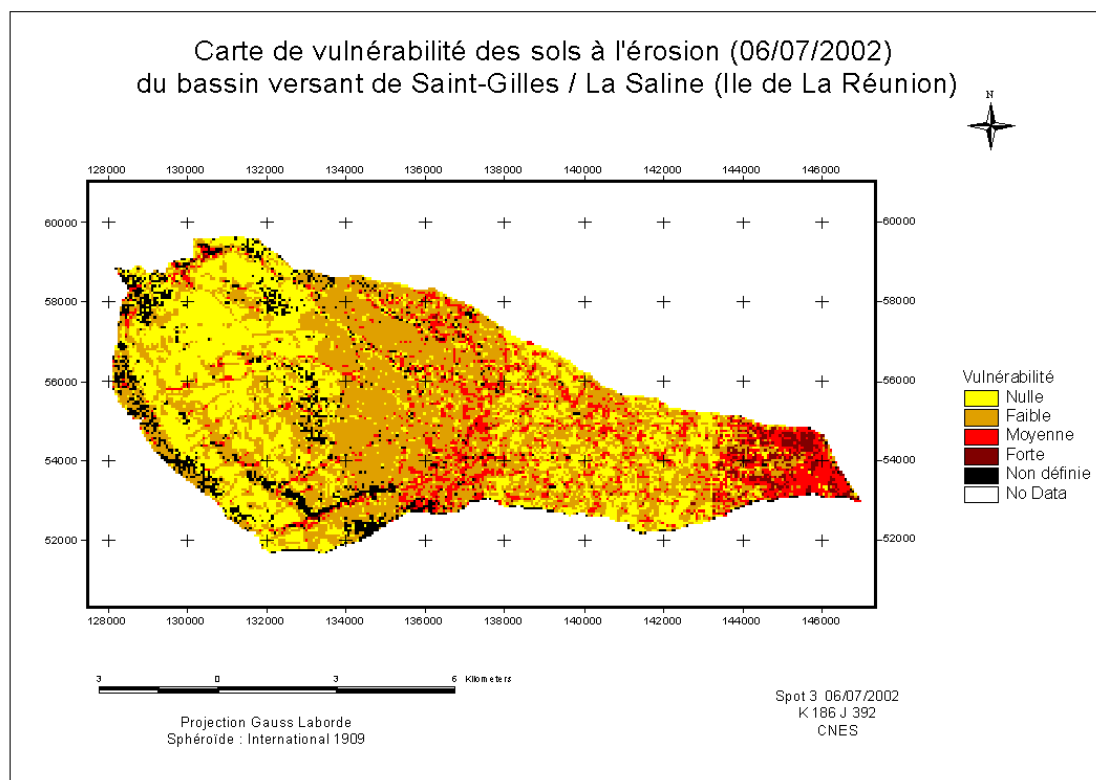


Figure 10 : Carte de vulnérabilité des sols en 2002



- *La zone de faible à moyenne vulnérabilité*, située entre 950 m et 1200 m, qui correspond à un territoire mité entre forêt, prairies et cultures fourragères.
- *La zone de moyenne à forte vulnérabilité* réunissant tous les attributs favorables à l'érosion, des sols fragiles, souvent nus et la présence de fortes pentes.

Au regard de cette première analyse, on observe une forte corrélation entre la vulnérabilité et l'élévation, montrant le poids de la pente sur les processus d'érosion.

Entre 1995 et 2002, l'étude temporelle de la vulnérabilité des sols à l'érosion, montre une augmentation importantes des classes de moyenne et de forte vulnérabilité dans les « hauts ». Cette vulnérabilité, c'est notamment aggravée dans la zone de transition canne / forêt, là où la canne est montée trop haut. Ce constat s'observe également à l'étage forestier, qui a vu son domaine se réduire au dépend des prairies, des cultures fourragères et parfois des sols nus, aggravant ainsi la vulnérabilité de cette zone où les pentes sont fortes. Concernant la zone des « bas », en dessous de 450 m d'altitude, on a une situation à peu près similaire entre les deux dates, malgré l'extension de l'aire de la canne à sucre. La prépondérance de la pente Dans le cadre de l'évolution temporelle, on voit que le facteur déterminant devient l'occupation du sol d'où l'intérêt de suivre et de contrôler ses changements. C'est pourquoi, il est important de disposer de cette couche d'information au sein d'étude traitant des impacts environnementaux et cela à des pas de temps réguliers. D'où l'intérêt de la télédétection qui permet de constituer assez rapidement une base de données « sol ».

4. Discussion des résultats

Concernant la classification de l'occupation du sol, il est vrai que la résolution spatiale des images satellites ne nous a pas permis d'établir une typologie détaillée des différents types d'occupation du sol. Les petites parcelles culturales, les vergers n'ont pas pu être identifiés correctement, ce qui a introduit quelques biais dans l'évaluation de la capacité de protection de la végétation. Il existe des méthodes de traitement basées sur le calendrier cultural qui permettent de discriminer différents types d'occupation du sol. Cependant à La Réunion, elles sont difficilement applicables sachant que la canne à sucre est replantée tous les trois ans et que la période de la coupe s'étend va de juillet et septembre selon la maturité de la culture. Certes, Janvier est le mois où l'on a le plus de parcelles à nue, après la coupe et avant les replantations, mais elles sont difficilement exploitables du fait de la forte nébulosité qui caractérise cette période.

La démarche qualitative adoptée pour l'analyse multicritère et les représentations cartographiques qui en découlent peuvent être critiquées. Cette démarche scientifique nous a paru la plus honnête, compte tenu du manque de données qualitatives dont nous disposons. Quantifier l'érosion n'a pas été notre propos, des modèles d'érosion existent déjà. Ils nécessitent de données précises et exhaustives qui n'existent pas toujours, notamment en terme d'occupation du sol ou taux de couverture végétal. Une simple comparaison visuelle des deux cartes de vulnérabilité du sol a permis de souligner l'impact de l'occupation du sol sur les processus érosifs. Dans le contexte de l'île de La Réunion, ces aménagements liés aux activités humaines sont importants et rapides, d'où la nécessité d'en suivre l'évolution, ce que les images satellites permettent aisément.

Ces cartes peuvent également être des supports d'aide à la décision. En effet, elles ont le mérite d'offrir une information spatialisée, qui permet assez rapidement de localiser les zones qui doivent être prioritairement contrôlées, voir protégées.

5 . Perspectives

Ces premiers résultats ont ouvert d'autres portes d'investigation :

1. Nous souhaiterions évaluer les potentialités de SPOT 5, voir si sa résolution spatiale à 10 m, permet d'établir une typologie plus détaillée des modes d'occupation du sol et donc de réaliser une carte de vulnérabilité des sols à l'érosion plus précise. Pour cela, nous proposons de réaliser ce travail sur l'image SPOT 5 du 06/07/2002 à 10 m, et comparer les différents résultats.
2. Réaliser des scenarii extrêmes, afin de délimiter les zones les plus vulnérables à l'érosion. Mais aussi afin de développer des documents visuels qui pourraient sensibiliser les collectivités locales à prêter une attention particulière au changements des modes d'occupation du sol.
3. Nous souhaiterions également étendre la méthodologie du système expert d'Erdas Imaging pour la détection des changements au suivi d'une classe au cours du temps.
4. Enfin, dans l'hypothèse où nous pourrions acquérir des données sur l'état du récif, il serait intéressant de mettre en relation ces dernières avec des données sur l'occupation du sol et de voir si l'on peut déterminer des seuils d'alerte de risque d'érosion et de pollution.

Bibliographie

ARVAM, 1999. - Les récifs coralliens de la Réunion .- Proposition de cartographie.- ARVAM : La Réunion.

Ballet J.L., Marre A., Mietton M., Miossec A., Morin S., Valadas B., Veyret Y., 1998. - L'érosion entre nature et société – Dossier des Images Economiques du Monde – Paris : SEDES - Dossier 22, 340p.

Chabanet P., 1995.- Structure et évolution des formations récifales de la Réunion et principales causes de leurs dégradations.- La réunion : ECOMAR: Acte du séminaire sur la protection des zones côtières (Seychelles).

Charleux J., Puech C., 2000. Qualité des MNT pour l'hydrologie : méthode de diagnostic de la qualité d'extraction de réseau hydrographique et des limites de bassins versants à partir d'un MNT, revue internationale de géomatique, 13p

Chevalier P., Hébert A., Kaufmant Y.,Moyen J., 2001. - Cartographie de l'aléa « érosion des sols » à la Réunion. - Phase 1 : caractérisation et cartographie des phénomènes érosifs -. Rapport BRGM RP -51236-FR - 2001 SGR/REU 27, 78p.

CIRAD, 1998.- Etude des possibilités d'aménagement de la partie basse de l'antenne 4.

Dutrieux E., Quod J.P., Bigot L., Hoarau S., Savelli A., Loubie S., Gayte O., Licari M.L., Letourneur Y., 1995.- Sensibilité et vulnérabilité des milieux marins de l'île de la Réunion.- Rapport DIREN Réunion, 136 p.

Faroli S., Le Page C., Tidbal M., Bommel P., 2001.- Gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion : analyse du comportement économique des acteurs selon une approche standard et par un système multi-agent. Séminaire de recherche « préservation et valorisation de l'eau dans le domaine littoral », Saint-Denis de la Réunion, 15 juin 2001.

Leynaud G. & al., 1976.-La pollution des eaux continentales – Incidences sur les biocénose aquatiques.- ss dir : P Besson.- Guthioer-Villars, 147p.

Montaggioni L., 1978.-Recherches géologiques sur les complexes récifaux de l'archipel des Mascareignes (Océan indien occidental).- Thèse Univ. Aix-Marseille II, 212 p. + annexes.

Montaggioni L. et Faure G., 1980. Les récifs coralliens des Mascareignes (O. Indien). Collection des travaux du Centre Universitaire. Université française de l'Océan Indien,151p.

Moulin M., Rossi F., 2001.- Caractérisation des facteurs favorisant les transferts polluants potentiels à l'échelle des bassins versants intéressant le secteur de l'Antenne 4 (Ile de La Réunion). rapport BRGM RP-509946FR / 2001-SGR/REU-15,55p.

ORE, ARDA, ECOMAR, LSTUR, UPMC, 1999.- Etat de référence qualitatif des eaux du littoral ouest « point zéro » - Département de La Réunion.

Naim O., 1991.- Dégradations de l'écosystème récifal à l'île de La Réunion.- Annales du colloque « Protection des lagons », Saint-Gilles, La Réunion.

Naim O., Mangar V. et Cuet P., 1997.- The coral Reefs of Mascarene archipelago, 15p.

Naim O. et Cuet P., 1989.- Les platiers récifaux de la Réunion- Bilan et dégradation de l'écosystème récifal.- Rapport Université de la Réunion.- ECOMAR : La Réunion, 47p.

Naim O. et Cuet P., 1989.- Sensibilité du littoral ouest et sud de la Réunion.- Bilan de dégradation de l'écosystème récifal.- ECOMAR : La Réunion, 75p.

Raunet M., 1991. – Le milieu physique et les sols de La réunion. – Conséquences pour la mise en valeur agricole. – CIRAD : Montpellier, 437p.

Recensement agricole, 2000. – L'Essentiel Réunion.- Agreste

Saffache, 2002.- Les Fonds marins de l'île de la Réunion : d'une prise de conscience des dégradations au projet d'une gestion raisonnée.- Le courrier de l'environnement, n°45, février 2002.

SECA-Environnement, 1998 : Charte de l'environnement.

Sites Internet :

www.environnement.gouv.fr/ifrecor

www.univ-reunion.fr

www.ifremer.fr/drvreunion

www.noaa.gov.fr/public-affairs/coral-reef.html

www.com.univ-mrs.fr/urcyano/chantiers/reunion

www.ore-oi.fr

www.bio.usyd.edu.au/CRR/crr-ind.html

www.worldfishcenter.org

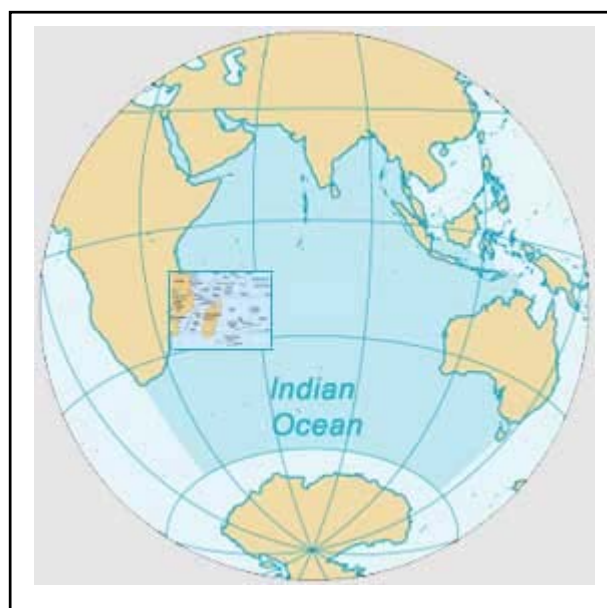
www.epa.gov

[Institut de Recherche pour le Développement \(IRD, ex ORSTOM\)](#)

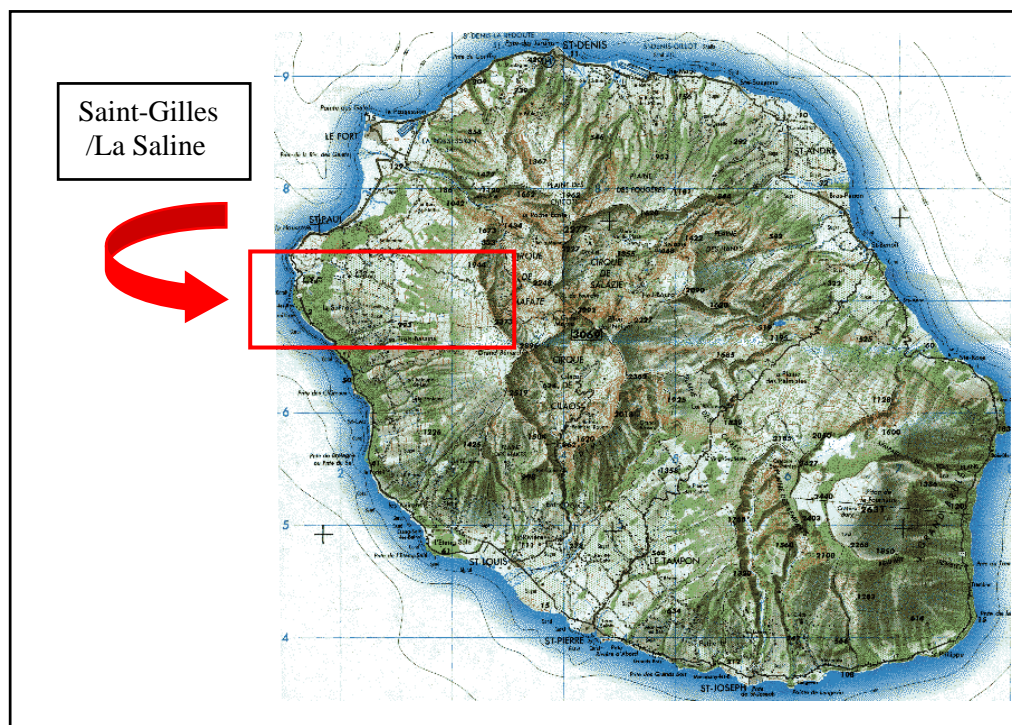
www.uncwil.edu/isrs/

Annexes

Annexe 1: Localisation géographique de l'île de La Réunion



Annexe 2 : Localisation géographique de la zone d'étude



Annexe 3 : Inventaire des images satellitales initialement proposé par le CNES

Date	K	J	Spot n°	HRV n°	mode	niveau	ang inc	accès	Qualité radiométrique	Observations sur les sites d'études
1986										
05/06/1986	186	392		2	XS		-5,2			Quart sud-est manquant
25/12/1986					XS					?
1987										
08/12/1987					XS					
1988										
26/04/1988					P					2 images à cette date et heure (HRV1 et 2)
03/09/1988	186	393		1	XS					
03/09/1988	186	393		1	P					
31/10/1988					P					2 images P ?
1989										
05/04/1989					P					
05/04/1989					P					
16/05/1989	186	392			P					
27/06/1989	186	392			P					
18/08/1989	186	392			P					
29/08/1989	186	392			XS					
29/08/1989	186	392			P					
24/09/1989	186	392	1	2	XS	1B	-25,8			
24/09/1989	186	392	1	2	P	1B	-25,8			
1990										
30/03/1990	186	392			XS					
30/03/1990										N'existe pas dans le catalogue ISIS
07/04/1990	186	392			XS					
07/04/1990	186	392			P					
03/05/1990	186	392			XS					
03/05/1990	186	392			P					
24/06/1990	186	392			P					2 images
14/08/1990	186	392			P					
14/08/1990										?
1992										
04/04/1992	186	392	2	1	P	1A		Contrôlé		
17/08/1992	186	392	2	2	P	1A		Libre		Strippée
1993										
10/10/1993	186	392	3	2	P	1A		Contrôlé		
1995										

15/06/1995	186	392	3	1	XS	1A		Contrôlé		
24/04/1995	186	392	3	1	XS	1A		Contrôlé		A voir
29/04/1995	187	392	3	2	XS	1A		Contrôlé		Manque Saline
30/06/1995	186	392	3	1	XS	1A		Contrôlé		A voir
06/07/1995	186	392	3	2	XS	1A		Contrôlé		
16/07/1995	186	392	3	2	XS	1A		Contrôlé		

1996										
07/05/1996	186	392	3	1	P, XS	1A		Libre		
09/07/1996	186	392	3	1	P	1A		Contrôlé		Manque Saline et une partie canne Ouest et Nord

1998										
11/05/1998	186	392	4	2, 1	P, XI	1A		Contrôlé		Panchro floue (?) et pas de Xi, Nuages sur Caruel
22/06/1998	187	392	4	2	XI	1A		Contrôlé		Manque Saline
13/07/1998	187	392	4	2	P	1A		Contrôlé		Manque Saline, P Floue ?
10/11/1998	187	392	4	1	P	1A		Contrôlé		Manque Saline, Nuages sur Barau
11/12/1998	187	392	4	1	XI	1A		Contrôlé	MIR Strippé	Manque Saline

1999										
11/04/1999	187	392	4	2	XI	1A		Contrôlé		
06/05/1999	187	392	4	2	XI	1A	18,11 R	Libre	PIR limite Saturation	Manque Saline, 2 images (prendre Imag_04)
27/06/1999	187	392	4	2	P	1A		Contrôlé		Floue ?
02/07/1999	187	392	4	1	XI	1A		Contrôlé	PIR Saturé	Manque Saline, Nuages/Caruel et Barau
12/07/1999	187	392	4	2	XI	1A	3,53 L	Contrôlé	PIR Saturé	Nuages/Caruel, Manque Saline
18/08/1999	187	392	4	2	XI	1A	18,11 R	Contrôlé	PIR Saturé	2 images identiques (?), Manque Saline
18/08/1999	187	392	4	2	P	1A	18,11 R	Contrôlé		Manque Saline

2000										
03/05/2000	186	392	4	2	XI	1A	18,34 L	Contrôlé	MIR strippé	Manque Saline
19/05/2000	186	392	4	2	XI	1A	2,54 L	Libre	MIR strippé	Saline coupé, Nuage/Ant4 et Barau
19/06/2000	186	392	4	2	XI	1A	11,0 L	Contrôlé	MIR strippé	Manque Saline
25/06/2000	186	392	4	2	XI	1A	18,52 R	Contrôlé	MIR strippé	Manque Saline
20/07/2000	186	392	4	2	XI	1A	17,53 L	Contrôlé	MIR strippé	Nuages/Barau et Caruel
21/08/2000	186	392	4	2	XI	1A	12,02 R	Contrôlé	PIR limite saturation, Mir strippé	Nuages/Ant4
01/11/2000	187	392	4	2	XI	1A	19,15 L	Contrôlé	MIR strippé	Manque Saline
13/12/2000	187	392	4	2	XI	1A	4,15 L	Contrôlé	MIR strippé	Manque Saline
18/12/2000	187	392	4	2	XI	1A	12,25 L	Contrôlé	MIR strippé	Manque Saline, Nuages/Barau, Ombres/Caruel

2001										
22/03/2001	186	392	4	2	XI	1A	4,33 R	Contrôlé	MIR strippé	Nuages/Tous les sites d'études
07/04/2001	187	392	4	2	XI	1A	18,11 R	Contrôlé	MIR strippé ++	Manque Saline, Nuages/Barau
29/05/2001	186	392	4	2	XI	1A	19,33 R	Contrôlé	MIR strippé	Nuages/Barau et Caruel
18/06/2001	186	392	4	1	XI	1A	10,41 L	Contrôlé	MIR strippé	Nuages/Barau et Caruel
29/06/2001	186	392	4	1	XI	1A	11,42 R	Contrôlé	MIR strippé	Manque Saline
15/07/2001	186	392	4	1	XI	1A	26,09 R	Contrôlé	MIR strippé	Nuages/Barau et Caruel

19/07/2001	186	392	4	1	XI	1A	18,13 L	Contrôlé	MIR strippé	Manque Saline
15/08/2001	186	392	4	1	XI	1A	19,15 R	Contrôlé		Nuages/Hauts Ant4, Nuages(-)/Caruel, Nuages(+)/Barau
20/09/2001	186	392	4	1	XI	1A	4,14 R	Libre	MIR strippé	Manque Saline, Nuages/Hauts Barau

2002										
01/04/2002	186	392	4	2	P+XS	1A		Contrôlé	Rouge (B2) saturée	Pas la bonne date, 04 janvier 2002, tout les sites dégagés
01/06/2002	186	392	5	2	J et A	1A	27,38 R	Contrôlé		
12/06/2002	186	392	4	1	P+XS	1A		Contrôlé	pb lecture CD	
06/07/2002	186	392	5	2	J, A, S	1A	25,08 R	Contrôlé		Première SPOT5 à 2,5 m Orthorectifiée
19/07/2002	186	392	4	2	P+XS	1A		Libre	canal PIR saturé+MIR strippé	Sites Est OK, sites Ouest pas dégagés
08/08/2002	186	392	4	1	P+XS	1A		Contrôlé		Sites Est 1/2 ok(Caruel 3/4; Barau pas dégagé), sites Ouest OK
14/08/2002	186	392	4	1	P+XS	1A		Contrôlé		Sites Est:Caruel 3/4 ok, Barau 2/3 ok, Sites Ouest OK
09/09/2002	186	392	4	1	P+XS	1A		Contrôlé	MIR strippé	Sites Est OK, sites Ouest:Cuvelier ok, Kalimoutou pas dégagé
22/09/2002	186	392	5	2	J	1A		Contrôlé		
09/10/2002	186	392	4	2	P+XS	1A		Contrôlé		Sites Est:caruel OK, Barau pas dégagé; sites Ouest:Cuvelier OK, Kalimoutou pas dégagé
18/10/2002	186	392	5	2	J, S	1A		Contrôlé		
13/11/2002	186	392	5	1	J, S	1A		Contrôlé	MIR saturé	Très nuageuse sur les hauts

Annexe 4 : Matrice de confusion de la classification non-supervisée du 06/07/95

<u>ERROR MATRIX</u>						
	Reference data					
Classified data	Sol nu	Savane	Prairie	Friche	Végétation arb.	Canne
Sol nu	3	0	0	1	0	0
Savane	3	29	0	7	2	0
Prairie	0	0	0	0	0	0
Friche	0	0	0	27	0	1
Végétation arborée	0	0	0	0	25	0
Canne à sucre	1	0	6	4	13	29

ACCURACY TOTALS

Class name	Reference totals	Classified totals	Number correct	Producers accuracy	Users accuracy
Sol nu	7	4	3	42.86%	75.00%
Savane	29	41	29	100.00%	70.73%
Prairie		0	0	---	---
Friche	39	28	27	69.23%	96.43%
Végétation arborée	40	25	25	62.50%	100.00%
Canne à sucre	30	53	29	96.67%	54.72%

KAPPA (K[^]) STATISTICS

Conditional Kappa for each category

Class name	Kappa
Sol nu	0.7378
Savane	0.6377
Prairie	0.0000
Friche	0.9518
Végétation arborée	1.0000
Canne à sucre	0.4349

Overall Kappa statistics = 0,6795

**Annexe 5 : Matrice de confusion de la classification non-supervisée du 06/07/95
améliorée par le système expert**

ERROR MATRIX

Classified Data	Reference Data					
	Sol nu	Savane	Prairie	Friche	Végétation Arb.	Canne
Sol nu	10	0	0	2	1	0
Savane	1	27	0	2	1	0
Prairie	0	0	6	0	0	0
Friche	0	0	0	25	2	1
Végétation arborée	1	0	1	1	35	1
Canne à sucre	0	0	0	2	4	28

ACCURACY TOTALS

Class name	Reference totals	Classified totals	Number correct	Producers accuracy	Users accuracy
Sol nu	12	13	10	83.33%	76.92%
Savane	27	31	27	100.00%	87.10%
Prairie	7	6	6	85.71%	100.00%
Friche	32	28	25	78.13%	89.29%
Végétation arborée	43	39	35	81.40%	89.74%
Canne à sucre	30	34	28	93.33%	82.35%

KAPPA (K[^]) STATISTICS

Conditional Kappa for each Category.

Class name	Kappa
Sol nu	0.7493
Savane	0.8429
Prairie	1.0000
Friche	0.8640
Végétation arborée	0.8566
Canne à sucre	0.7798

Overall Kappa Statistics = 0.8338

Annexe 6 : Matrice de confusion de la classification non-supervisée du 06/07/02

ERROR MATRIX

	Reference data					

Classified data	Sol nu	Savane	Prairie	Friche	Canne	Végétation arb.
Sol nu	24	0	1	0	0	0
Savane	8	16	0	1	0	0
Prairie	2	0	16	5	1	1
Friche	2	0	0	20	1	2
Canne	0	0	0	0	18	7
Végétation arb.	0	0	0	1	2	22

ACCURACY TOTALS

Class name	Reference totals	Classified totals	Number correct	Producers accuracy	Users accuracy
Sol nu	36	25	24	66.67%	96.00%
Savane	16	25	16	100.00%	64.00%
Prairie	17	25	16	94.12%	64.00%
Friche	27	25	20	74.07%	80.00%
Canne	22	25	18	81.82%	72.00%
Végétation arb.	32	25	22	68.75%	88.00%

Overall Classification Accuracy = 77.33

Annexe 7 : Matrice de confusion de la classification non-supervisée du 06/07/02 améliorée par le système expert

ERROR MATRIX

	Reference Data					
Classified Data	Végétation arb.	Canne	Friche	Savane	Sol nu	Prairie
Végétation arb.	32	2	5	0	0	0
Canne à sucre	1	18	1	0	0	0
Friche	2	0	26	0	0	0
Savane	0	0	0	16	2	0
Sol nu	0	0	1	0	27	0
Prairie	1	2	4	0	0	10

ACCURACY TOTALS

Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producers Accuracy	Users Accuracy
Végétation arb.	36	39	32	88.89%	82.05%
Canne à sucre	22	20	18	81.82%	90.00%
Friche	37	28	26	70.27%	92.86%
Savane	16	18	16	100.00%	88.89%
Sol nu	29	28	27	93.10%	96.43%
Prairie	10	17	10	100.00%	58.82%

KAPPA (K[^]) STATISTICS

Conditional Kappa for each Category.

Class name	Kappa
Végétation arb.	0.7638
Canne	0.8828
Friche	0.9052
Savane	0.8756
Sol nu	0.9557
Prairie	0.5588

Overall Kappa Statistics = 0.8283